

**А. Г. Гончар**

**УПРАВЛЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТЬЮ  
НАЗЕМНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО  
ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ И  
ПУСКА РАКЕТ КОСМИЧЕСКОГО  
НАЗНАЧЕНИЯ**

Монография

**КБТМ  
Москва  
2009**

УДК. 629.7:629.7.01

ББК 39.6

Г65

Рецензенты:

д-р техн. наук, проф. В. А. Меншиков

д-р техн. наук, проф. А. Г. Милованов

**Гончар А. Г.**

Г65 Управление безопасностью наземного технологического оборудования для подготовки и пуска ракет космического назначения. Монография. – М.: Издательство КБТМ, 2009. – 436 с.: ил.

ISBN 978-5-9901665-2-3

В монографии представлены системотехнические положения методологии формирования облика организационно-технической структуры комплекса управления безопасностью. Основу предлагаемой методологии составляют: система оценивания безопасности процессов подготовки и проведения пусков РКН на этапах проектирования и эксплуатации наземного технологического оборудования; математические модели информационно-технического обеспечения безопасности процессов подготовки и проведения пусков ракет космического назначения на этапах проектирования и эксплуатации технологического оборудования технических и стартовых комплексов; методики формирования организационно-кадровой структуры, численности и квалификации обслуживающего персонала комплекса управления безопасностью. Сформулированные и решенные задачи относятся к классу задач структурно-функционального синтеза сложных систем, их решение охватывает этапы проектирования, создания, испытаний и эксплуатации систем. Разработанные методы имеют достаточно общий характер и могут использоваться при проектировании и эксплуатации как космических ракетных комплексов, так и других, сходных по сложности и динамике протекания процессов технических систем.

Монография написана на основе научно-исследовательских работ, выполненных автором, и адресована научным работникам, руководителям предприятий-разработчиков технологического оборудования сложных технических комплексов, а также специалистам организаций, эксплуатирующих сложные энергетические системы. Может быть полезна преподавателям, аспирантам и студентам высших учебных заведений соответствующего профиля.

УДК. 629.7:629.7.01

ББК 39.6

© А. Г. Гончар

© Оформление. Издательство КБТМ, 2009

ISBN 978-5-9901665-2-3

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                                                                                                                                                     |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ .....                                                                                                                                                                                             | 6          |
| ПРЕДИСЛОВИЕ.....                                                                                                                                                                                                    | 8          |
| <b>I. БЕЗОПАСНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ<br/>КОСМИЧЕСКИХ РАКЕТНЫХ КОМПЛЕКСОВ<br/>И ПУТИ ЕЕ ПОВЫШЕНИЯ НА ВСЕХ СТАДИЯХ<br/>ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО<br/>ОБОРУДОВАНИЯ СТАРТОВЫХ И<br/>ТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ .....</b> | <b>18</b>  |
| 1.1. Проблемы обоснования облика комплекса<br>управления безопасностью .....                                                                                                                                        | 20         |
| 1.2. Методика построения математического<br>аппарата для оценивания качества работы комплекса<br>управления безопасностью .....                                                                                     | 29         |
| 1.3. Применение системного подхода к<br>обоснованию облика комплекса управления<br>безопасностью .....                                                                                                              | 57         |
| 1.4. Концептуальные положения для обоснования<br>облика комплекса управления безопасностью .....                                                                                                                    | 71         |
| 1.5. Математическая модель комплекса управления<br>безопасностью на операционном уровне .....                                                                                                                       | 84         |
| <b>II. СИСТЕМА ОЦЕНИВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ<br/>ПРОЦЕССОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ<br/>ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ,<br/>ТЕХНИЧЕСКИХ И СТАРТОВЫХ КОМПЛЕКСОВ<br/>НА ЭТАПАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И<br/>ЭКСПЛУАТАЦИИ.....</b>            | <b>115</b> |
| 2.1. Источники опасности процессов<br>функционирования технологического оборудования<br>технических и стартовых комплексов.....                                                                                     | 115        |

|                                                                                                                            |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.2. Комплекс показателей, участвующих в<br>оценивании безопасности.....                                                   | 120 |
| 2.3. Алгоритм формирования выражений для<br>показателей, участвующих в оценивании<br>безопасности .....                    | 131 |
| 2.4. Семантические особенности описания<br>безопасности .....                                                              | 140 |
| 2.5. Показатель безопасности функционирования<br>технологического оборудования технических и<br>стартовых комплексов ..... | 146 |

|                                                                                                                                                                                  |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>III. МЕТОДЫ ИНФОРМАЦИОННО-<br/>ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ<br/>ПРОЦЕССОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ<br/>ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ<br/>ТЕХНИЧЕСКИХ И СТАРТОВЫХ<br/>КОМПЛЕКСОВ .....</b> | <b>184</b> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|

|                                                                                                                                                                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.1. Особенности информационно-<br>технического обеспечения процессов безопасности<br>функционирования технологического оборудования<br>технических и стартовых комплексов .....                                         | 184 |
| 3.2. Системы сбора информации. Система<br>мониторинга комплекса управления безопасностью.....                                                                                                                            | 196 |
| 3.3. Технология сбора информации о техническом<br>состоянии объектов технологического оборудования<br>технических и стартовых комплексов .....                                                                           | 218 |
| 3.4. Оценивание технического состояния<br>технологического оборудования технических и<br>стартовых комплексов. Показатель<br>работоспособности технологического оборудования<br>технических и стартовых комплексов ..... | 251 |

|                                                                                                                                                                                 |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>IV. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ<br/>УПРАВЛЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТЬЮ<br/>ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ<br/>ТЕХНИЧЕСКИХ И СТАРТОВЫХ<br/>КОМПЛЕКСОВ .....</b>                                | <b>266</b> |
| 4.1. Синтез организационно-кадровых структур<br>управления безопасностью .....                                                                                                  | 267        |
| 4.2. Организационно-техническая структура<br>управления безопасностью .....                                                                                                     | 325        |
| 4.3. Система поддержки принятия решений при<br>управлении безопасностью .....                                                                                                   | 341        |
| <b>V. ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ<br/>ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ КОМПЛЕКСА<br/>УПРАВЛЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТЬЮ<br/>ПРОЦЕССОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ<br/>ТЕХНИЧЕСКИХ И СТАРТОВЫХ<br/>КОМПЛЕКСОВ .....</b> | <b>358</b> |
| 5.1. Внедрение методологических положений по<br>формированию КУБ .....                                                                                                          | 360        |
| 5.2. Принцип равной безопасности НТО ТК и СК<br>и его реализация .....                                                                                                          | 365        |
| 5.3. Обеспечение безопасности НТО ТК и СК на<br>основе мониторинга его технического состояния .....                                                                             | 385        |
| 5.4. Обеспечение безопасности функционирования<br>наземного технологического оборудования<br>технических и стартовых комплексов на основе<br>адаптивного управления ЗИП .....   | 412        |
| ЛИТЕРАТУРА .....                                                                                                                                                                | 423        |

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АСУ – автоматизированная система управления  
АСУ ПП – автоматизированная система управления подготовкой и пуском  
ГСТ – главная ступень тяги  
ЗИП – запасные части, инструменты, принадлежности  
ИВЦ – информационно-вычислительный центр  
КА – космический аппарат  
КАСУ – комплекс автоматизированных систем управления  
КБ – конструкторское бюро  
КБТМ – Конструкторское бюро транспортного машиностроения  
КГЧ – космическая головная часть  
КД – конструкторская документация  
КМК – конструкторский моделирующий комплекс  
КРК – космический ракетный комплекс  
КРТ – компоненты ракетных топлив  
КССИ – каналы и средства сбора информации  
КУБ – комплекс управления безопасностью  
ЛПР – лицо, принимающее решение  
НИОКР – научно-исследовательская и опытно-конструкторская работа  
НИР – научно-исследовательская работа  
НКУ – наземный комплекс управления  
НТД – нормативно-техническая документация  
НТО – наземное технологическое оборудование  
ОКР – опытно-конструкторская работа  
ОС – опасная ситуация  
ОСУ – организационная структура управления  
ПСТ – промежуточная ступень тяги  
ПУ – пусковое устройство  
РБ – разгонный блок

РКД – рабочая конструкторская документация  
РКН – ракета космического назначения  
РН – ракета-носитель  
СК – стартовый комплекс  
СППР – система поддержки принятия решения  
ТЗ – техническое задание  
ТК – технический комплекс  
НТО – технологическое оборудование  
ТЭЦ – теплоэнергоцентр  
УСК – универсальный стартовый комплекс  
ЭД – эксплуатационная документация

## ПРЕДИСЛОВИЕ

За более чем полувековой период космонавтика прошла большой и сложный путь. На этом пути ракета как летательный аппарат, преодолевающий земное тяготение, всегда была на острие исследований и разработок. Большинство сложнейших технологических и научных проблем всегда концентрировалось вокруг ракет и космических аппаратов. При этом наземная космическая инфраструктура, стартовые и технические комплексы ракет космического назначения считались чем-то вторичным и тривиальным.

В наше время космонавтика вступила в эру «освоения» околоземного и космического пространства и в будущем из уникальной, высокотехнологичной, пока преимущественно затратной области человеческой деятельности неизбежно должна превратиться в масштабную промышленную отрасль наподобие современной авиации.

Требования времени диктуют иные подходы к созданию космической техники. И, пожалуй, в наибольшей степени это должно коснуться наземной инфраструктуры. Императивом дня является дешевый доступ в космос.

Именно это требование и будет определять облик перспективных средств выведения. Время уникальных систем проходит. На передний план выступают такие принципы создания техники, как:

- системный подход;
- иерархичность построения: космодром, космический ракетный комплекс, ракета-носитель;
- универсализм, предусматривающий возможность обслуживания (вхождения) в один космический ракетный комплекс различных ракет-носителей;



- простота, предполагающая отход от уникальных, дорогостоящих и зачастую опасных технологий, связанных, например, с токсичными топливами;
- низкая стоимость, основанная на минимизации операций сборки и обслуживания космической техники на космодроме и резком сокращении численности обслуживающего персонала;
- гибкость дислокации (наземное, воздушное или морское базирование), обеспечивающая оптимальные с точки зрения энергетики и безопасности трассы выведения;
- минимальное экологическое воздействие на окружающую среду.

И сегодня, в новых условиях, профессиональная деятельность ведущих отечественных КБ продолжается, совершенствуется их структура и материальная база. Для обеспечения успешной разработки комплексов повышенной сложности совершенствуется и внедряется в процесс ведения комплексных работ организационная основа, развивается научно-технический задел и создается система контроля за исполнением принятых решений, повышаются профессиональные знания специалистов. Все это обеспечивает высокий технический уровень создаваемых комплексов, способствует укреплению авторитета отечественных КБ, создающих и эксплуатирующих объекты наземной инфраструктуры космических ракетных комплексов (КРК).

В частности, обеспечение высокого научно-технического уровня и подтверждение хорошей репутации КБТМ предполагают активное участие в научно-исследовательских работах. Основными направлениями, на которых будут сосредоточены усилия ведущих науч-

ных и инженерно-технических кадров, в ближайшее время станут:

1. Автоматизация процессов проектирования и конструирования КРК как при модернизации, так и при разработке новых комплексов. Это должно обеспечить создание и проведение испытаний виртуальных КРК и, как следствие, снизить затраты и время на практическую реализацию проектов в «металле».

2. Оптимизация структуры и состава наземной космической инфраструктуры, позволяющей КРК решать на требуемом уровне возлагаемые задачи при минимизации затрат на ее содержание, эксплуатацию и развитие за счет комплексного учета и влияния друг на друга основных факторов космических средств и программ запусков КА.

3. Развитие методов оценивания показателей технического совершенства стартовых и технических комплексов, позволяющих получать объективную оценку технического совершенства и степени соответствия конкретного комплекса (как созданного, так и перспективного) предъявляемым со стороны заказчика требованиям, а также возможностей его создания и экономической эффективности применения.

4. Разработка для каждого КРК имитационно-моделирующих комплексов, позволяющих:

- решать различные инженерно-конструкторские и исследовательские задачи на этапах создания, эксплуатации, модернизации, утилизации КРК, в том числе при формировании перечня возможных опасных ситуаций и их последствий, при анализе и выявлении причин возникновения аварийных ситуаций,

при продлении назначенных показателей эксплуатационного ресурса;

- решать задачи, связанные с обеспечением использования КРК по назначению в заданное время, с заданными показателями надежности и экономичности;

- решать задачи, связанные с обеспечением подготовки эксплуатационного персонала к применению КРК по назначению, обучением персонала с использованием компьютерных интерактивных тренажеров правилам эксплуатации КРК.

5. Разработка моделей, описывающих технологические процессы (операции) подготовки к пуску РКН и позволяющих проводить оптимизацию сложных многоуровневых процессов при подготовке РКН к пуску, а также контроль характеристик технологических процессов в реальном масштабе времени.

6. Анализ перспектив развития комплектующих элементов и разработка методического обеспечения, позволяющего в условиях применения комплектующих импортного производства и практически уже ежегодного обновления их состава и номенклатуры оптимизировать построение и состав ЗИП перспективных и модернизируемых КРК.

Исследованием и реализацией этих принципов применительно к наземному оборудованию КБТМ уже занимается и намерено развивать эти направления в будущем. Неприятие консерватизма – так можно сформулировать позицию коллектива КБТМ, позволившую заслужить репутацию новаторов и превзойти лучшие мировые достижения в технике подготовки и пуска ракет.

Это достигалось путем проведения строгого научного анализа выполненных ОКР и достигнутых результатов, формирования и постоянного пополнения пакета

соответствующих научно-исследовательских работ по совершенствованию технологий и технических средств подготовки и запуска ракет, решительного внедрения результатов научных исследований в опытно-конструкторские работы для достижения сформулированных целей:

- безопасности,
- надежности,
- требуемых тактико-технических характеристик,
- технической новизны,
- экономической эффективности.

Одним из важнейших свойств КРК является безопасность его функционирования на всех этапах жизненного цикла. Безопасность КРК – сложное и трудно формализуемое свойство. От безопасности подготовки и пуска РКН на стартовых (СК) и технических (ТК) комплексах во многом зависит конкурентоспособность российской ракетно-космической техники на мировом рынке аэрокосмических услуг, а также перспективность разрабатываемых и совершенствуемых космических систем и технологий, в том числе и для решения оборонных задач.

Безопасность функционирования наземного технологического оборудования технических и стартовых комплексов (НТО ТК и СК) имеет экономический, оперативно-тактический, технический, гуманитарный и другие аспекты. Безопасностью процессов функционирования сложных технических комплексов занимались многие авторы и коллективы. При этом до сих пор результаты таких исследований касались лишь отдельных сторон обеспечения безопасности. В известных сегодня подходах к обеспечению безопасности просматривается

описание опасных факторов как неких статичных явлений, которым необходимо уметь противостоять. Кроме того, многие известные на сегодня подходы в обеспечении безопасности для сложных технических комплексов ограничены исследованием лишь наиболее значимых объектов в таких комплексах.

В данной монографии сделана попытка рассмотреть безопасность процессов функционирования сложных технических комплексов наземной инфраструктуры КРК с позиций максимального охвата всех источников зарождения, развития и проявления опасности. Результаты исследований, представленные в монографии, направлены на перевод декларативных требований и пожеланий НТД, записанных в нечетких лингвистических шкалах, в четкий язык математики, обеспечивающий формулировку конкретных практических предложений и рекомендаций по обеспечению безопасности процессов функционирования НТО ТК и СК.

Монография посвящена решению проблемы, которая обусловлена противоречием между сложностью строения и динамичностью поведения НТО ТК и СК, с одной стороны, и на сегодняшний день, к сожалению, пока еще фрагментарным, статичным воздействием на безопасность процессов их функционирования, с другой стороны.

Для достижения поставленной цели решены следующие взаимосвязанные задачи:

- ✓ Разработаны системотехнические положения методологии формирования облика организационно-технической структуры комплекса управления безопасностью (КУБ).

- ✓ Сформирована система оценивания безопасности процессов подготовки и проведения пусков РКН на этапах проектирования и эксплуатации НТО ТК и СК.

✓ Разработаны математические модели информационно-технического обеспечения безопасности процессов подготовки и проведения пусков РКН на этапах проектирования и эксплуатации НТО ТК и СК.

✓ Разработаны методики формирования организационно-кадровой структуры, определения численности и квалификации обслуживающего персонала КУБ.

По мнению автора, представленные в монографии результаты являются новым, существенным шагом на пути исследования возможности повышения уровня безопасности функционирования космических ракетных комплексов.

Монография состоит из пяти разделов.

**В первом разделе** представлены результаты разработки методологических основ создания комплекса управления безопасностью технологического оборудования технических и стартовых комплексов для подготовки и пуска ракет космического назначения. Рассмотрен системотехнический подход к формированию комплекса управления безопасностью НТО ТК и СК, содержащий концептуальный, операционный и функциональные уровни, построенные с учетом специфики исследуемого объекта.

**Во втором разделе** монографии представлена система оценивания безопасности процессов функционирования НТО ТК и СК на этапах их проектирования и эксплуатации, а также результаты анализа источников опасности, сопровождающих технологические процессы в НТО ТК и СК, семантического анализа основных понятий для описания КУБ. Представлен кортеж показателей для оценивания безопасности процессов функционирования НТО ТК и СК. Приведен единый алго-

ритм формирования показателей, имеющих единую масштабность и нулевую размерность. Определены функциональные взаимосвязи этих показателей, оценивающих безопасность процессов функционирования СК и ТК, а также определены технические предпочтения в достижении максимальной безопасности процессов функционирования НТО ТК и СК, к которым относится доминирующее влияние на безопасность процессов функционирования НТО ТК и СК качества проектных работ по созданию наземной части КРК.

***В третьем разделе*** монографии предложены методы информационно-технического обеспечения процессов функционирования НТО ТК и СК. Выполнен анализ информационно-технического обеспечения процессов безопасности функционирования НТО ТК и СК. Предложены новые организационные положения по созданию информационно-технического обеспечения процессов функционирования НТО ТК и СК. Выявлено центральное звено в управлении безопасностью НТО ТК и СК, на основании которого предложена необходимость организации безопасности через оценивание технического состояния НТО ТК и СК. В основы оценивания технического состояния НТО ТК и СК рекомендовано положить систему функционального мониторинга технического состояния НТО. В разделе приведены методологические принципы и математические модели, позволяющие решать задачу обоснования достаточности и необходимости информации о безопасности функционирования для конкретных объектов НТО ТК и СК.

***Четвертый раздел*** посвящен вопросам организации процессов управления безопасностью НТО ТК и СК. В этом разделе при рассмотрении организационно-

кадровой структуры управления КУБ установлено, что целевое единство процессов управления эксплуатацией и обеспечения безопасности НТО ТК и СК гарантирует матричная организационно-кадровая структура управления безопасностью. Установлено также, что организационно-кадровая структура управления безопасностью должна быть наполнена специалистами, не требующими принципиально нового уровня подготовки. Количество таких специалистов не приводит к существенному увеличению общего количества обслуживающего персонала. Расчет КУБ должен формироваться на основе взаимозаменяемости обслуживающего персонала КРК в целом, а его численность определяется особенностями функционирования каждого конкретного комплекса. В разделе также приводится методика определения численности такого расчета. Показано, что для успешной работы расчета КУБ необходима система поддержки принятия решений, которая должна быть построена как для проектных, так и для эксплуатационных задач управления безопасностью. Рекомендовано, что система поддержки принятия решений должна быть построена в виде информационно-вычислительной системы.

***В пятом разделе*** представлены основные направления реализации полученных в работе практических положений, затрагивающих технический, кадровый, административный и программно-аппаратный аспекты управления безопасностью НТО ТК и СК, рассчитанные на длительный период. Частичная реализация таких результатов представлена новыми штатными структурными подразделениями предприятия, комплексами по проектированию, моделированию и управлению созданием образцов новой техники (КМК), системой автоматизи-



рованного формирования исходных данных (САФИД), автоматизированной системой координации и управления работ СК и ТК (АСКУР) и др. При этом показано, что помимо повышения уровня безопасности функционирования НТО ТК и СК получен заметный рост прибыли для предприятия, что позволяет инвестировать в дальнейшее внедрение новых научно-технических разработок в повседневную деятельность КБТМ.

Настоящая монография наряду с известными и апробированными методами и моделями содержит оригинальные результаты, полученные лично автором в ходе проведенных исследований.

Автор выражает признательность за многолетнее, плодотворное сотрудничество в области решения проблем по обеспечению безопасности функционирования космических ракетных комплексов, полезные советы и рекомендации при написании монографии д.т.н., профессору Перминову А.Н., д.т.н. Федорову А.В., д.т.н., профессору Гранкину Б.К., к.т.н., доценту Шарапову В.С., к.т.н. Шаповалову Р.В., к.т.н. Абросимову Н.А., а также коллективам кафедры «Стартовые комплексы» МАТИ (РГТУ) им. К.Э. Циолковского, кафедры «Управления эксплуатацией РКС» МАИ и кафедры «Транспортные установки» МАДИ (ГТУ).

Отдельную благодарность и признательность автор выражает д.т.н., профессору Козлову В.В. и д.т.н., профессору Смирнову В.И., совместно с которыми сформирована общая структура монографии и написан ее первый раздел.

# **I. БЕЗОПАСНОСТЬ ЭКСПЛУАТАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ РАКЕТНЫХ КОМПЛЕКСОВ И ПУТИ ЕЕ ПОВЫШЕНИЯ НА ВСЕХ СТАДИЯХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ СТАРТОВЫХ И ТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ**

Одной из ключевых научных проблем для дальнейшего развития космической отрасли России является обеспечение безопасности состояния и поведения технологического оборудования, на котором осуществляется подготовка и пуск ракет космического назначения.

Безопасность состояния и поведения наземного технологического оборудования технических и стартовых комплексов из состава космических ракетных комплексов (КРК) имеет большое оборонное, социально-политическое и коммерческое значение.

Обеспечение постоянного повышения уровня безопасности НТО ТК и СК в настоящее время сопряжено с серьезными трудностями по следующим основным причинам:

- накопленный практический опыт проектно-конструкторского и эксплуатационного обеспечения безопасности НТО ТК и СК носит разрозненный характер и требует обобщения;
- существующая нормативно-техническая база по обеспечению безопасности при создании и эксплуатации космической техники не отвечает современным условиям и нуждается в корректировке;
- известные на сегодня в области обеспечения безопасности КРК методологические и теоретиче-

ские разработки затрагивают лишь отдельные стороны этого процесса.

Настоящая монография посвящена проблеме достижения принципиально нового уровня безопасности НТО ТК и СК. Она обусловлена имеющимся противоречием между сложностью строения и динамичностью поведения НТО ТК и СК, с одной стороны, и пока фрагментарным, как правило, статичным воздействием на безопасность процессов их функционирования – с другой. Данная проблема предполагает решение в систематизированном виде следующих задач:

- разработка методологических основ формирования комплекса управления безопасностью НТО ТК и СК;
- разработка математических моделей для оценивания уровня безопасности НТО ТК и СК на всех этапах их жизненного цикла;
- обоснование и определение состава и функций систем технического, информационного и организационного обеспечения управления безопасностью НТО ТК и СК;
- разработка рекомендаций и предложений по внедрению комплекса управления безопасностью НТО ТК и СК в процессы их функционирования.

### **1.1. Проблемы обоснования облика комплекса управления безопасностью**

Комплекс управления безопасностью НТО ТК и СК подготовки и пуска ракет космического назначения (КУБ) должен быть применим к различным КРК. В то же время каждый КРК является сложной и уникальной системой. На вербальном уровне представляется, что действия активных технических и интеллектуальных средств КУБ должны быть направлены на все объекты, входящие в состав КРК.

Процесс создания КУБ, как и любой сложной технической системы, содержит следующие процедуры:

- принятие решения о разработке комплекса;
- формирование требований к комплексу и состава задач, реализуемых им;
- проектирование и принятие решения на производство;
- производство и ввод в эксплуатацию,

и должен выполняться параллельно с проектированием и созданием КРК. Однако практическая реализация этого процесса осложняется тем, что такой комплекс сегодня следует создавать и для существующих КРК. В связи с этим появляются дополнительные условия и ограничения, связанные с особенностями уже эксплуатируемых КРК, на которых, как правило, уже выработаны ресурсные показатели.

Обычно исходные данные на проектирование сложных комплексов содержатся в технических заданиях, которые разрабатываются сегодня в соответствии с нормативными документами.

Техническое задание в первоначальном виде обычно формулируется заказчиком и выдается голов-

ному разработчику комплекса для согласования. В техническом задании устанавливаются требования к разрабатываемому комплексу, в том числе основные технические и эксплуатационные характеристики, достижение которых должно быть обеспечено при разработке комплекса, а затем подтверждено при его испытаниях.

Опыт эксплуатации НТО ТК и СК показывает, что КУБ является необходимым, но новым элементом в структуре КРК, наличие которого не предусмотрено существующими НТД. Поэтому для него согласно [1] следует сформулировать цель и назначение, а также систему предъявляемых требований.

При формировании целевого предназначения, а также перечня и содержания требований к комплексу основное внимание уделяется следующим трем основным группам вопросов:

- установление выполнимости назначенных требований, возможности проектирования без проведения поисковых и/или фундаментальных научно-исследовательских работ (НИР);
- уточнение и конкретизация требований и их согласование с заказчиком;
- оценка трудоемкости и сроков выполнения проектных работ, их согласованности с условиями и возможностями проектирования и изготовления компонентов комплекса.

Эта процедура является первым и ответственным этапом, поэтому к ее выполнению должны привлекаться наиболее квалифицированные специалисты. Они должны хорошо ориентироваться в современном состоянии и научно-технических достижениях в области проектируемых систем.

Если цель КУБ можно сформулировать исходя из названия – управление безопасностью функционирования НТО ТК и СК для поддержания ее в рамках назначенного уровня, то остальные атрибуты комплекса могут быть сформированы лишь на основе системного подхода, широко используемого для сложных технических систем.

При формировании внешнего облика КУБ следует иметь формализованные ответы на следующие вопросы:

1. Как и почему назначены те или иные значения показателей? А если они назначены правильно, то как и за счет чего их достичь и как проверить их соответствие спроектированному комплексу?

2. Каким образом можно обеспечить выполнение требований системы более высокого уровня (КРК)?

3. Как сформулированы заказчиком КРК требования для КУБ по решению его целевых задач?

4. При расходовании каких ресурсов достигаются значения показателей из назначенных характеристик и является ли такой расход ресурсов (в том числе и интеллектуальных) допустимым и оправданным?

Системный подход к решению этой проблемы показывает, что последовательность этой процедуры должна быть следующей.

Организационно-управленческая структура КРК должна выполнить анализ изменений уровня безопасности процессов функционирования НТО ТК и СК, оценить рассогласование требуемых (нормативных) и прогнозируемых характеристик, после чего принять решение о разработке новой (перспективной) системы.

При этом КУБ как сложная система должен придать КРК новое интегральное качество как совокупность свойств, обуславливающих его пригодность для использования по назначению.

Как известно, качество любого объекта, в том числе и КУБ, в полной мере проявляется лишь в процессе его использования по назначению. Поэтому наиболее объективным является оценивание качества объекта по эффективности его применения [2]. Для КУБ такую эффективность следует назвать эффективностью управления безопасностью.

Для оценивания КУБ он должен быть подвергнут испытаниям, в ходе которых и выявляется его качество. Однако КУБ не может быть испытан в условиях развития и распространения факторов опасности для НТО ТК и СК. В этом случае для «управления качеством» КУБ [3] необходимо оценивать его еще в процессе создания, а оценивание возможно лишь в процессе испытаний или эксплуатации, когда комплекс уже создан. Поэтому необходима априорная оценка качества, которая возможна, если известны соотношения, связывающие характеристики комплекса с выходными эффектами его целевого применения.

Таким образом, возникают как минимум два вопроса:

1. Как на уровне КРК понимается, а на уровне КУБ формулируется целевой эффект и какие характеристики КУБ необходимы для оценивания его эффективности?

2. В детерминированной или стохастической постановке формулировать задачу?

Эффективность управления безопасностью – это комплексное свойство процесса функционирования КУБ, характеризующее его приспособленность к дос-

тижению заданного целевого назначения. Число, которое характеризует эффективность управления безопасностью, рассматривается как его численная оценка и называется показателем эффективности управления безопасностью.

Любой показатель  $P_{\langle n \rangle}$  эффективности включает в себя три группы [4] компонент:  $Q_{\langle n_1 \rangle}$  – показатель целевого эффекта (результативности),  $C_{\langle n_2 \rangle}$  – показатель затрат ресурсов (ресурсоемкости),  $T_{\langle n_3 \rangle}$  – показатель затрат времени (оперативности),  $n, n_1, n_2, n_3$  – размерность соответствующих векторов. Применительно к КУБ в качестве показателя эффективности управления безопасностью автор на основе собственного практического опыта по эксплуатации и созданию НТО ТК и СК предлагает вводить в этот показатель вероятностную компоненту, учитывающую вероятность оценивания степени опасности, и детерминированную компоненту, которую можно было бы рассчитать на этапе проектирования КУБ, когда комплекс еще не создан.

Набор конкретных свойств (оцениваемых или участвующих в оценивании) параметров зависит от рассматриваемых свойств комплекса. Эти свойства могут быть объединены в следующие группы (рис. 1.1).

В группе структурных (схемных) свойств и связей элементов КУБ к таким характеристикам относятся: общее число элементов, общее число связей элементов, число связей каждого элемента, соотношение числа связей и числа элементов, сложность связей, «достижимость» одних элементов из других и пр.



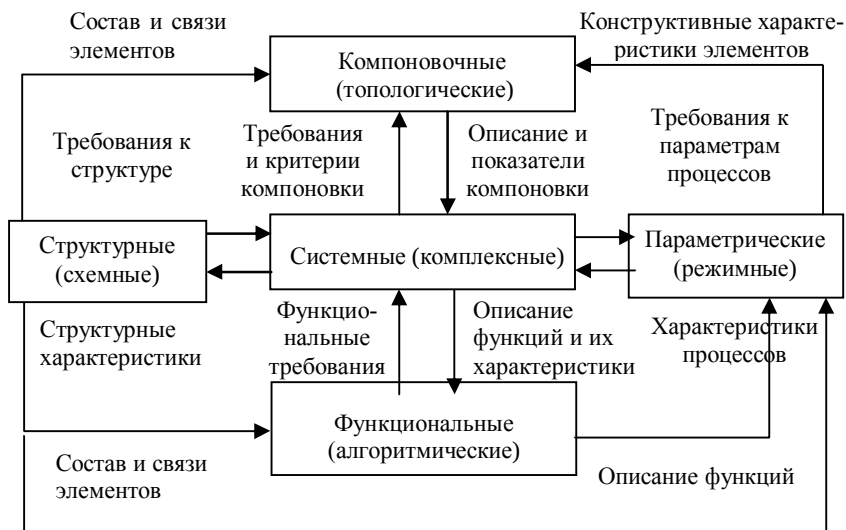


Рис. 1.1. Группы свойств КУБ

Содержание группы функциональных свойств отражает возможности комплекса по выполнению им определенных функций. К таким характеристикам относятся: количество выполняемых функций и их последовательность, количество вариантов выполнения одной и той же функции, сложность функций, затраты на выполнение отдельных функций и пр.

Группа параметрических свойств отражает режимные характеристики процессов (быстродействие управления, устойчивость управления, чувствительность и пр.), а также конструктивные характеристики (мощности, скорости обработки информации, объемы памяти и пр.).

Группа компоновочных свойств содержит учет взаимного расположения объектов комплекса в пространстве или на плоскости. К ним относятся количество устройств для сбора информации, расположенных в пространстве, расстояния, число пересечений линий коммуникаций и пр.

Группа системных свойств отражает выходные показатели, на значения которых влияют одновременно несколько групп свойств. К таким показателям относятся эффективность управления, надежность, безопасность, живучесть и пр.

Таким образом, для того чтобы строго и грамотно сформулировать облик КУБ, необходимо знание как самого комплекса, так и комплексов, которыми он управляет, – НТО ТК и СК (объекта управления). Поэтому при формировании КУБ должны быть известны: количество видов НТО ТК и СК, число входящих в их состав агрегатов и систем, описание технологических операций и физических параметров, которые планируется задать в качестве исходной информации для оценивания безопасности, а также организация эксплуатации объекта управления, содержание рабочей конструкторской и эксплуатационной документации (РКД и ЭД), порядок их оформления и контроля внесения изменений в эти документы. Поэтому на этапе проектирования КУБ необходимо решить следующие задачи:

- разработать требования, предъявляемые к КУБ;
- разработать принципы построения КУБ, отвечающие назначенным требованиям;
- разработать структуру КУБ и его частей по основным согласованным критериям;

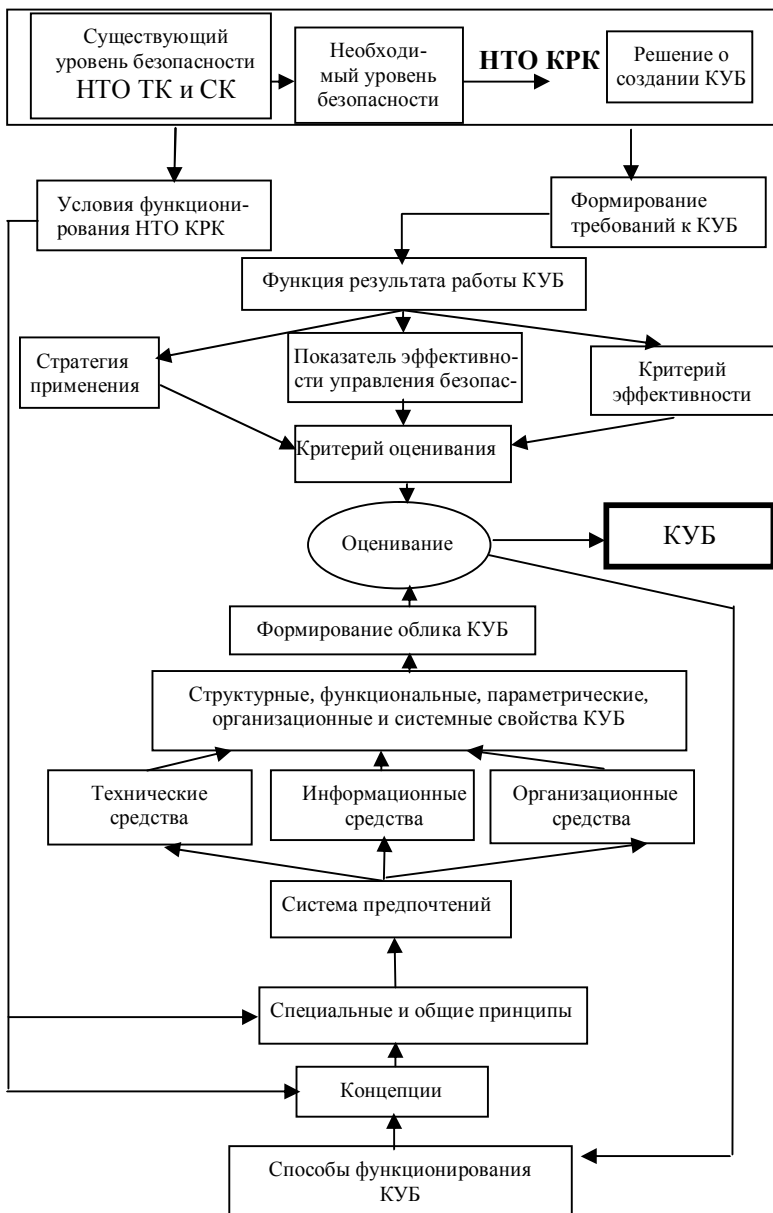
- разработать принципы построения технических средств КУБ с назначенными характеристиками;
- разработать принципы построения организационной структуры КУБ.

Предварительное формирование облика КУБ должно начинаться с анализа принципов, на основе которых может быть реализовано достижение его предназначения – обеспечение заданного уровня безопасности функционирования НТО ТК и СК. В результате анализа отбираются конкурентоспособные варианты, для которых выполняются следующие этапы предварительного проектирования:

- обоснование технических средств, необходимых для сбора информации об уровне опасности процессов функционирования НТО ТК и СК;
- обоснование технических средств воздействия на объекты НТО ТК и СК с целью приведения уровня опасности для них в заданные нормативные значения;
- обоснование организационных приемов и методов управления безопасностью.

Общий алгоритм формирования облика КУБ схематично представлен на рис.1.2.

Наполнение этого алгоритма фактическим содержанием является основной задачей, решению которой посвящена настоящая монография. Эта задача имеет два (согласно рис. 1.2) встречных направления: первое направление – разработка методики построения математического аппарата для оценивания качества работы КУБ, второе – поэтапное обоснование его облика.



## **1.2. Методика построения математического аппарата для оценивания качества работы комплекса управления безопасностью**

Рис. 1.2

1.2.1. Основные положения методики построения математического аппарата для оценивания качества КУБ основаны на теории принятия решений, результатах исследования эффективности технических систем, теории управления, а также на системном анализе и методах общей системотехники.

Несмотря на то что общие теоретические положения системного подхода к сложным системам разработаны Г.Х. Гудом и Р.Э. Маколом [5], С. Оптнером [6], Н.П. Бусленко, В.В. Калашниковым и Н.И. Коваленко [7], В.В. Дружининым [8], В.И. Николаевым, В.М. Бруком [9] и Б.А. Резниковым [10], для системотехники КУБ необходимо было разработать ряд положений, учитывающих как особенности исследуемого объекта, так и специфику рассматриваемого вопроса (этапа формирования облика КУБ для НТО ТК и СК). Эти положения основывались на результатах исследований, выполненных ранее.

Первые научные обобщения системного характера в области создания НТО КРК были опубликованы в работах руководителей ведущих КБ космической отрасли А.П. Абрамова [11], В.П. Бармина [12], В.М. Караштина [13], В.Н. Соловьева [14].

Теоретическое обоснование методов анализа космических ракетных комплексов как объектов системных исследований даны в работах Г.П. Бирюкова [15], С.Д. Любарского [16], А.М. Воробьева [17], В.Г. Елисеева [18], А.К. Недайводы [19].

Методологические вопросы системных исследова-

ний сложных объектов ракетно-космической техники обобщены в трудах Б.А. Резникова [20], Б.В. Соколова [21]. В работах В.Я. Иванина [22], В.Ф. Хлыбова [23], Б.К. Гранкина [24] и его учеников В.С. Шарапова [25], А.Е. Егорова [26], Ф.С. Аксянова [27], И.О. Голикова [28], А.Г. Шульженко [29] и А.В. Федорова [30] рассматривались вопросы структурно-функционального анализа и синтеза пневмогидравлических систем и агрегатов НТО КРК.

В работах С.В. Тимашева и Ю.Н. Чилина [31] рассматривались проблемы системного анализа и синтеза объединенных энергетических установок КА. Вопросам системных исследований процессов и эксплуатации объектов ракетно-космической техники посвящены работы И.В. Лысенко [32], А.П. Ковалева [33], В.Л. Гузенко [34]. Экономические аспекты системного анализа КРК рассматривались в работе П.А. Козина [35]. Тем не менее научные проблемы системных обоснований облика нового элемента космического ракетного комплекса (КУБ) практически не поднимались.

В работах [36÷43] рассматриваются теоретические подходы и методы оценивания, анализа и обеспечения безопасности функционирования сложных технических систем, сходных по своим техническим характеристикам с НТО ТК и СК.

Вопросам общего управления наземной космической инфраструктурой посвящены работы А.Н. Перминова и Л.Т. Баранова [44, 45].

1.2.2. КУБ создается для удовлетворения требований по безопасности функционирования НТО ТК и СК и служит активным средством управления состоянием КРК.

Проблема создания КУБ связана с выбором на-

правления действий для достижения поставленной цели – снижения потенциального уровня опасности процессов функционирования НТО ТК и СК и сохранения этого уровня в условиях длительной эксплуатации комплексов. Модель проблемной ситуации представляется в виде системы:

$$\langle S, \Lambda, G, Y, H, \Pi, \psi, K, P, \Theta \rangle,$$

где  $S$  – множество стратегий,  $\Lambda$  – множество значений определенных и неопределенных факторов,  $G$  – множество исходов операции,  $Y$  – вектор характеристик исходов  $g \in G$ ,  $H$  – отображение, ставящее в соответствие множествам стратегий  $S$  и факторов  $\Lambda$  множество результатов  $Y(G)$ ,  $\Pi$  – показатель эффективности управления,  $\psi$  – оператор соответствия «результат – показатель»,  $K$  – критерий эффективности управления,  $P$  – модель предпочтения,  $\Theta$  – остальная информация о проблемной ситуации.

Одним из центральных мест в решении этой проблемы является выбор выражения для оценивания эффективности управления безопасностью НТО ТК и СК. Для такой большой и сложной системы, как КУБ, подход, основанный на определении только потенциальной эффективности управления безопасностью, недостаточен. Для всестороннего оценивания необходимо дополнительно ввести несколько уровней качества, описывающих трудно формализуемые и агрегируемые свойства КУБ.

При формировании облика КУБ одна из основных задач заключается в построении его математической модели и определении его качественных и количественных характеристик. Эта задача сводится к моделированию элементов КУБ математическими схемами, формализации связей между элементами и нахождению ти-

пичных для КУБ свойств элементов. Таким образом, проблема создания КУБ распадается на задачу структурного синтеза и локальные задачи определения системных свойств его элементов.

Высокая сложность и неопределенность требуемых для этого комплекса архитектурных построений и свойств его элементов вынуждает приступить к формированию его облика с наиболее общих позиций. Достаточную общность в формировании и исследовании сложных комплексов могут обеспечить теория систем и теория управления [46].

Теория систем, как известно, представляет собой научную дисциплину, которая изучает различные явления, отвлекаясь от их конкретной природы и основываясь лишь на формальных взаимосвязях между различными составляющими их факторами и на характере их изменений под влиянием внешних условий. При этом результаты всех наблюдений объясняются лишь взаимодействием компонентов, например характером их организации и функционирования, а не с помощью непосредственного обращения к природе вовлеченных в явление механизмов, будь они физическими, биологическими, социальными или частично концептуальными, что и наблюдается в НТО ТК и СК при оценивании и управлении безопасностью их работы. Для теории систем объектом исследования является не «физическая реальность», не химическое или социальное явление, а «система», т.е. формальная взаимосвязь между наблюдаемыми признаками и свойствами. В силу ряда принципиальных соображений язык, используемый для описания поведения систем, – это язык теории обработки информации и теории целенаправленного действия – принятия решений и управления. Кроме того, для сложных явлений, каким является управление безопасно-



стью, специфический язык, используемый классическими теориями, которые базируются на таких конкретных математических структурах, как дифференциальные или разностные уравнения, арифметические соотношения или положения абстрактной алгебры, не позволяет адекватным и надлежащим образом описать происходящее в реальности. К тому же представляется, что управление безопасностью сложных технических комплексов, которыми являются ТК и СК КРК, характеризуется несоответствием между характером управления безопасностью и имеющимися возможностями его описания. Вместе с тем недостаток сведений о возникновении и развитии опасных ситуаций можно сформулировать лишь в самых общих терминах, имеющих качественный, а весьма часто и просто лингвистический характер.

Приступая к формированию облика КУБ, можно констатировать, что интересующая нас информация недостаточна для построения его детальной математической модели. В такой ситуации удастся построить модель на языке общей теории систем. Модели такого типа вполне могут служить прочной основой для дальнейшего более подробного синтеза КУБ.

Обращаясь к вопросам формирования облика КУБ с использованием теории управления, можно отметить, что центральную роль в этой теории играют три понятия:

✓ Достижимость. Прежде чем искать оптимальное управление безопасностью ТК и СК, следует удостовериться, что искомое состояние безопасности достижимо. Для оценивания такого состояния следует ввести показатель безопасного состояния ( $P_{\text{безопасн}}$ ), который был бы способен оценивать уровень безопасности во всех состояниях, в которых может находиться НТО ТК и СК.

✓ Наблюдаемость. Прежде чем направить все усилия на достижение этого свойства, нужно удостовериться, что выходных функций достаточно много для того, чтобы определить, возможно за некоторый период времени, части вектора состояния ТК и СК. Иными словами, следует определить достаточное количество технических параметров НТО ТК и СК, по значениям которых можно делать заключение о том, что удастся однозначно определить их техническое состояние ( $P_{\text{набл}}$ ).

✓ Реализация. Для адекватного управления безопасностью ТК и СК должно быть возможно построение достаточно точной модели комплексов или их реализации.

Таким образом, интегральное качество КУБ представляется многомерным вектором. При оценивании качества объекта, описываемого многомерным векторным показателем, используется совокупность критериев, каждый из которых в общем случае может принадлежать одному из трех классов:

- критериев пригодности;
- критериев превосходства;
- критериев оптимальности.

Среди перечисленных выше свойств КРК особое место занимает эффективность управления безопасностью ( $P_{\text{упр}}^{\text{эф}}$ ). Показатель эффективности управления безопасностью  $P_{\text{упр}}^{\text{эф}}(s)$  зависит от стратегии  $S$ . Здесь под стратегией ( $S$ ) мы понимаем вербально назначенный способ лучшего расположения и употребления всех сил и средств для достижения назначенной цели.

Он определяется на множестве допустимых стратегий  $S$

$$\psi : S \rightarrow P_{\text{упр}}^{\text{эф}},$$

т.е. отображением множества допустимых стратегий  $S$  во множество значений показателя эффективности управления безопасностью  $\Pi_{упр}^{эф}$ . Для исследуемого случая формирования облика КУБ при определенных условиях и способах его применения в качестве стратегии  $s \in S$  могут выступать совокупности характеристик того или иного варианта облика КУБ.

Поэтому необходимо определить набор способов использования активных средств как множество допустимых стратегий, а из этого множества выбрать необходимую стратегию

$$s^* \in S.$$

Для этого используется критерий эффективности управления безопасностью  $K$ , как правило, позволяющий сопоставить стратегии, характеризующиеся различной степенью достижения цели. Критерий эффективности управления безопасностью вводится на основе концепции рационального поведения.

Из трех известных концепций рационального поведения систем:

- пригодности,
- оптимизации,
- адаптивизации,

на данном этапе обоснования облика КУБ целесообразно выбрать оптимизацию. Это объясняется тем, что при исследовании основных концептуальных построений проведения операции, определении предварительного перечня подцелей операции и задач подсистем КУБ, формировании его «концептуального» облика необходимо многократно и оперативно решать задачу синтеза (рис. 1.3) через анализ (рис. 1.4) с целью отбраковки заведомо «худших» альтернатив.

# Синтез КУБ

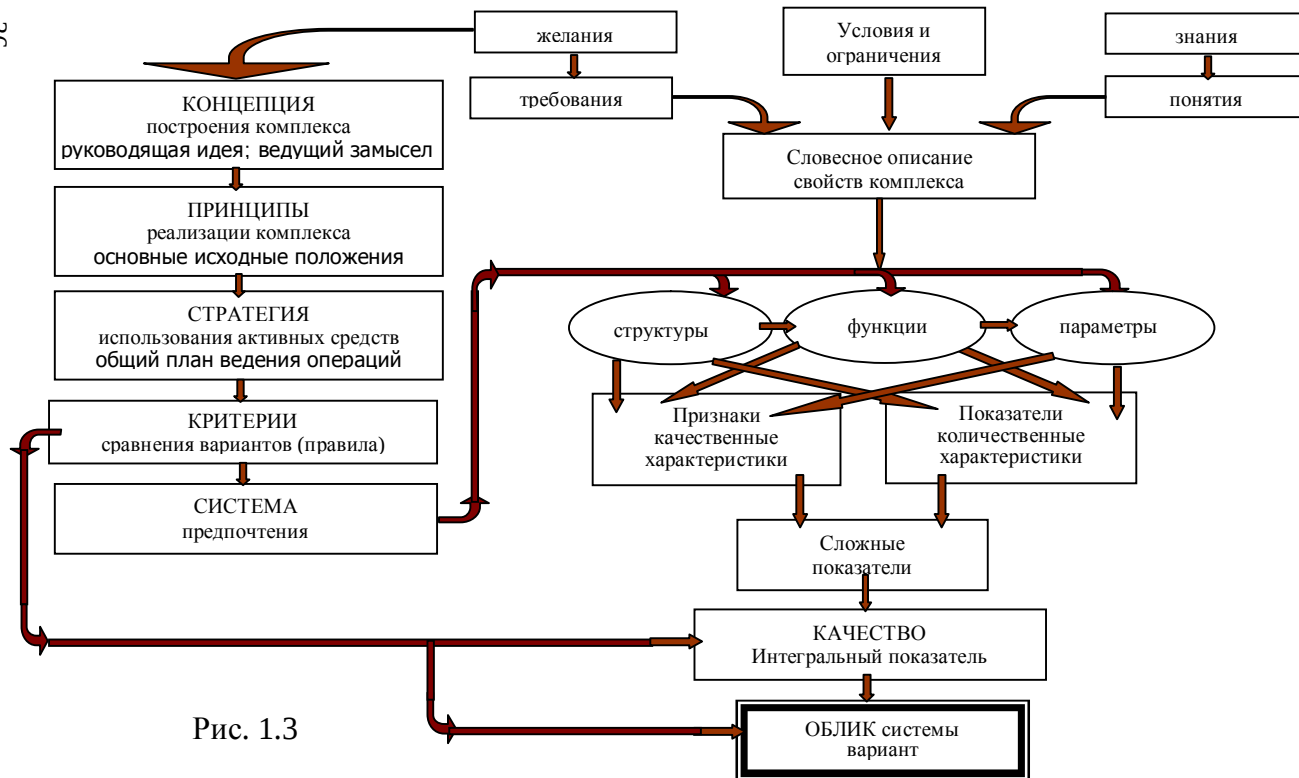


Рис. 1.3

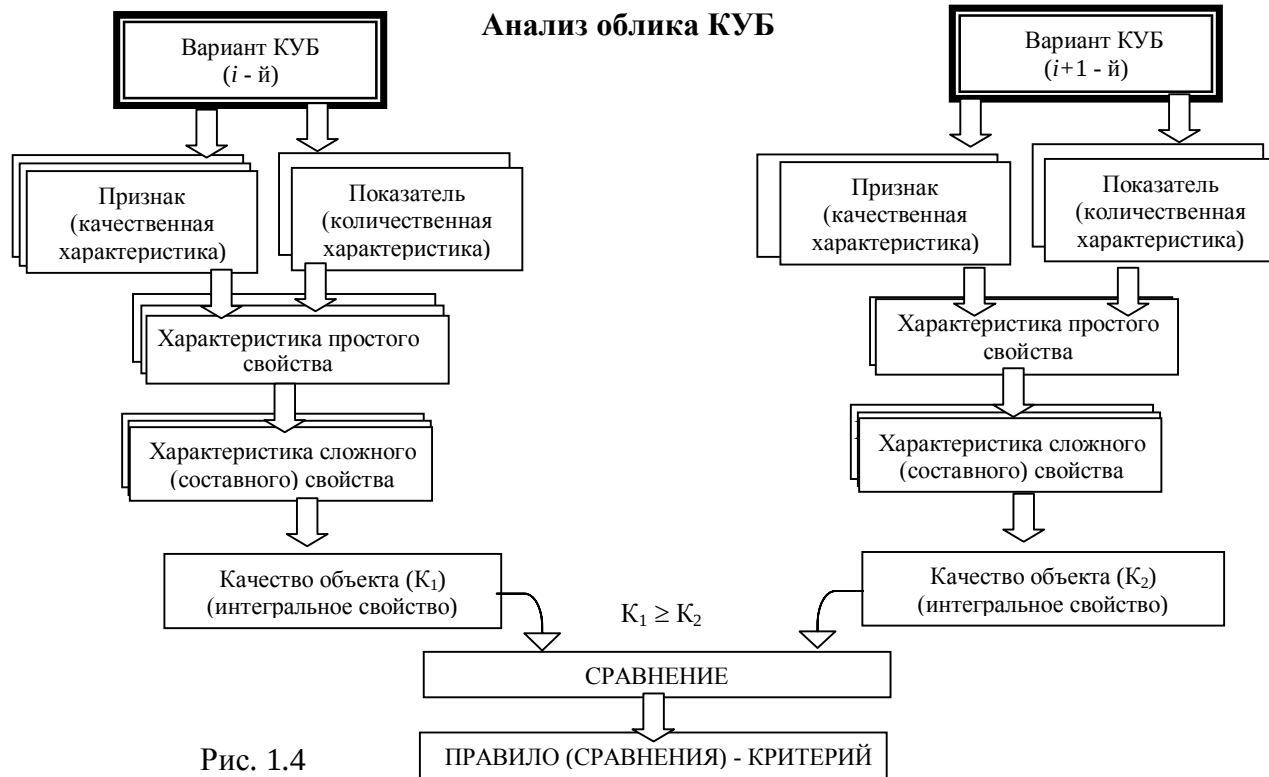


Рис. 1.4

В этом случае целесообразно представить модели  $H$  и  $\psi$  в виде обобщенных аналитических моделей и использовать методы оптимизации. Кроме того, не имеет смысла создавать сложные стохастические модели, поскольку не существует эффективного математического подхода к оптимизации сложных стохастических процессов [47].

В рамках концепции оптимизации, как известно, выделяют четыре критерия оптимальности:

- наибольшего результата;
- наибольшего среднего результата;
- наибольшей вероятности гарантии результата;
- наибольшего гарантированного результата.

Из перечисленного списка только критерий наибольшего результата

$$s^* : \max_{s \in S} Y(s)$$

позволяет выбрать оптимальную стратегию в детерминированном виде. Таким образом, концепция оптимизации указывает на то, что максимальный эффект операции достигается при условии

$$\Pi_{\text{упр}}^{\text{эф}}(s^*) = \max_{s \in S} \Pi_{\text{упр}}^{\text{эф}}(s).$$

Полученный таким образом детерминированный подход к оцениванию облика КУБ предусматривает, что общая задача должна решаться методами теории оптимального управления, основанными на принципе оптимальности Беллмана или принципе максимума Понтрягина.

Поскольку показатель эффективности управления безопасностью  $\Pi_{\text{упр}}^{\text{эф}}$  есть мера степени соответствия реального результата операции требуемому, то он может измеряться как в метрической, так и в порядковой шкалах.

По-разному может формироваться и само выражение для показателя эффективности управления безопасностью. Формально показатель эффективности управления безопасностью  $\Pi_{упр}^{эф}$  рассматривается как отображение эффективности управления безопасностью НТО ТК и СК на числовую ось:

$$\Pi_{упр}^{эф} : E \rightarrow R^1.$$

В свою очередь эффективность управления безопасностью  $E$  определяется через группу результирующих факторов, к которым относятся полезный эффект  $Q$ , затраченные ресурсы  $C$  и сроки  $T$ . Результат операции описывается функцией от результирующих факторов

$$Y = || Q, C, T ||.$$

Основным требованием при выборе вида выражения для показателя эффективности управления безопасностью является соответствие показателя цели операции, которая отображается требуемым результатом  $Y^{mp}$ . Поэтому для описания соответствия реального результата  $Y$  операции требуемому  $Y^{mp}$  формально необходимо ввести числовую функцию соответствия на множестве результатов операции:

$$F = f(Y(s), Y^{mp}),$$

таким образом

$$\Pi_{упр}^{эф} = f(Y(s), Y^{mp}).$$

Следовательно, для получения численного значения показателя эффективности управления безопасностью и выполнения процедуры оценивания вариантов КУБ, получаемых в процессе его синтеза, необходимо:

- установить выражение для расчета показателя безопасности;

- установить вид функции результата  $Y(Y^{mp})$ , при этом необходимо ввести понятие требуемого результата  $Y^{mp}$  (или эталонного комплекса);

- установить вид функции соответствия или выражение для расчета функции показателя эффективности управления безопасностью, который также неизвестен;

- определить эффективную стратегию  $s^*$ ;
- выявить и формализовать полезный эффект  $Q$ ;
- формализовать и агрегировать выражения для оценивания всех видов расходуемых ресурсов  $C$ .

Таким образом, для формирования облика КУБ практически все показатели оказываются не определенными в действующих нормативно-технических документах (НТД).

Это обстоятельство усиливается еще и тем, что для определения понятия управляемости КУБ необходимо вводить некоторую оценочную функцию, или показатель качества, позволяющий уточнить, что же считается желаемым поведением КУБ. В классической теории управляемости систем эти функции в явном виде не фигурируют [48].

В то же время управляемость гарантирует возможность достижения любой заданной оценки  $v \in V$  при любых внешних условиях, т.е. при любых  $u \in U$  [48]. Для динамической системы, к которой можно отнести КУБ, упорядоченное и желаемое изменение состояний относится к задачам управления. Такие системы характеризуются  $n$  переменными состояниями (фазовыми переменными)  $x_1(t), x_2(t), x_3(t), \dots, x_n(t)$ , удовлетворяющими  $n$  дифференциальным уравнениям первого порядка



$$\frac{dx_i}{dt} = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_n),$$

являющимся уравнениями состояния системы. Типичные переменные состояния – обобщенные координаты и скорости, а время  $t$  – независимая переменная. Задача управления состоит в определении  $\mathbf{r}$  управляющих переменных (управления)

$$u_k = u_k(t) \quad (k = 1, 2, \dots, r)$$

как функции от времени ( $t$ ) в интервале  $t_0 \leq t \leq t_F$ , минимизирующих заданный критерий-функционал (критерий качества)

$$x_0(t_F) = \int_{t_0}^{t_F} f_0(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_n) dt$$

и удовлетворяющих неравенству

$$Q_j(u_1, u_2, \dots, u_r) \leq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, N),$$

определяющему замкнутую область допустимых управлений  $U$ .

Оптимальное управление  $u_k(t)$  определяет оптимальную траекторию  $x_i = x_i(t)$  в  $n$ -мерном пространстве. Решение такой задачи управления требует задания подходящих граничных условий для определения начальных и конечных значений  $x_i = x_i(t_0)$ ,  $x_i = x_i(t_F)$ ; начальное и конечное время  $t_0$ ,  $t_F$  могут быть независимыми.

Критерий-функционал удобно трактовать как конечное значение  $x_0(t_F)$  дополнительной переменной состояния  $x_0(t)$ , удовлетворяющей уравнению

$$\frac{dx_0}{dt} = f_0(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_n)$$

и начальному условию  $x_0(t_0) = 0$ . Необходимое условие оптимального управления выражается принципом Понтрягина. Оптимальное управление, минимизирующее критерий-функционал, реализуется допустимыми

управляющими переменными  $u_k = u_k(t)$ , которые максимизируют *гамильтонову функцию*

$$H(x_1, x_2, \dots, x_n; p_1, p_2, \dots, p_n; u_1, u_2, \dots, u_r) = \sum_{i=0}^n p_i f_i$$

для каждого  $t$  между  $t_0$  и  $t_F$ .

Сопряженные переменные  $p_0(t), p_1(t), \dots, p_n(t)$  определяются как решение  $(n+1)$  дифференциальных уравнений первого порядка

$$\frac{dp_i}{dt} = - \sum_{k=0}^n \frac{\partial f_k}{\partial x_i} p_k \quad (i = 0, 1, 2, \dots, n; t_0 < t < t_F),$$

причем  $p_0(t) = \text{const} \leq 0$ .

Для  $n$  уравнений Эйлера

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial F}{\partial \dot{x}_i} \right) - \frac{\partial F}{\partial x_i} = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n),$$

которые эквивалентны  $2n$  уравнений первого порядка

$$\dot{x}_i = \frac{\partial H}{\partial p_i}, \quad \dot{p}_i = - \frac{\partial H}{\partial x_i}, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

относительно  $2n$  функций  $x_i$  и  $p_i = \partial F / \partial \dot{x}_i$ , где

$$\left. \begin{aligned} & H(x_1, x_2, \dots, x_n; p_1, p_2, \dots, p_n; t) \equiv \\ & \equiv \sum_{i=1}^n p_i \dot{x}_i - F(x_1, x_2, \dots, x_n; \dot{x}_1, \dot{x}_2, \dots, \dot{x}_n; t) \Big\} \\ & \det [F'_{xi \ xk}] \neq 0 \end{aligned} \right\}$$

называется канонической системой уравнений Эйлера.

В классической динамике канонически сопряженные или присоединенные переменные  $p_i$  интерпретируются как обобщенные моменты, а гамильтонова функция  $H$  имеет размерность энергии.

Максимизация гамильтониана дает

$$\frac{\partial H}{\partial u} = 0,$$

где  $u$  - управляющая переменная.

Так как принцип максимума выражает лишь необходимые, но недостаточные условия оптимальности управления, то метод Понтрягина может давать несколько кандидатур оптимального решения, либо же решения не существует [20].

Поскольку цель управления безопасностью – максимальное использование потенциальных возможностей, заложенных в НТО ТК и СК для решения поставленных задач, то управление тем эффективнее, чем ближе значение показателя безопасности ( $P_{\text{безопасн}}$ ) к его предельному значению.

Процедура поиска главного выражения для оценивания КУБ может быть частично упрощена, если осуществить декомпозицию еще одного важного понятия эффективности. Из определения эффективности естественно выделяются компоненты: результат достижения цели и ресурсопотребления. Поэтому возможно рассматривать узконаправленные аспекты эффективности:

- целевую эффективность – характеристику степени приспособленности объекта к достижению цели по назначению. Для КУБ военного назначения целевая эффективность определяется применительно к условиям боевой обстановки (боевая эффективность, оцениваемая характеристиками выполнения боевых задач с учетом понесенных потерь, действия опасных факторов поражения и затраченных средств и времени);

- техническую эффективность – комплексную характеристику технических возможностей и приспособленности работы КУБ в условиях мирного времени, эр-

гономичности и экологичности эксплуатации НТО ТК и СК;

– экономическую эффективность и ресурсосберегаемость – характеристику затрат всех видов ресурсов на достижение заданной цели, отнесенных к временным интервалам.

В НТД космической отрасли рекомендуют проводить совместные исследования целевой и экономической эффективности. Такие исследования иногда называют исследованиями по критерию “эффективность – стоимость”. Один из распространенных недостатков таких исследований состоит в том, что при их проведении обычно недостаточно учитывается влияние всех факторов, показателей, существенных для анализа эффективности комплекса. Для сегодняшнего состояния отечественной космонавтики актуальной является эффективность жизненного цикла НТО ТК и СК. Понятие жизненного цикла относится к числу основных понятий в экономике, системном анализе и системотехнике. Оно вводится как для серийного образца, так и для больших технических систем, в том числе и уникальных ТК и СК. Для них имеет значение оценка эффективности жизненного цикла с учетом физического и морального старения техники на интервале времени жизненного цикла.

Для того чтобы решать задачи оценивания эффективности управления безопасностью НТО ТК и СК или задачи эффективного выбора варианта КУБ, необходимо опираться на конкретные показатели. Здесь проявляется ещё одна проблема – отсутствие таких показателей как по объективным, так и по субъективным причинам. Поэтому в условиях нечеткого и неполного набора существующих показателей необходим алгоритм получения таких интегральных показателей, которые обладали

бы необходимой содержательностью, интерпретируемостью и измеряемостью, чтобы существование или появление неизвестных сегодня показателей не изменило выражения для показателя эффективности управления безопасностью КУБ. С этой целью необходимо агрегировать известные на сегодня показатели и выявить для них наиболее общее свойство. Для этого на первой стадии они могут быть разбиты на следующие группы:

*1. Группы показателей целевой эффективности:*

- показатели возможностей достижения конечных целей;
- показатели устойчивости в условиях действия опасных факторов;
- показатель наблюдаемости и распознаваемости опасной ситуации.

*2. Группы показателей технической эффективности:*

- показатели качества функционирования (производительность, мощность, оперативность);
- эксплуатационно-технические (надежность, экологичность и др.);
- эргономические и эстетические.

*3. Группа показателей экономической эффективности и ресурсосберегаемости:*

- стоимостные показатели и показатели расхода материальных ресурсов;
- стоимостные показатели по оцениванию интеллектуальных затрат и численности обслуживающего персонала.

*4. Группа показателей эффективности жизненного цикла:*

- временные показатели;

– показатели прогрессивности (научно-технического уровня, способности к адаптации).

Все рассмотренные показатели имеют конкретное физическое или стоимостное содержание либо отражают результаты экспертных и других исследований о качестве системы (нечеткие показатели). Возможность агрегирования показателей лишь частично снижает остроту проблемы. При формировании показателей для КУБ проявляется ещё одна проблема – определение зависимостей выражения одних, более общих показателей через различные частные показатели. Для разрешения этой проблемы удобнее использовать скалярное представление частных показателей, которое носит название сверток. При этом необходимо выбрать одну из известных сверток параметров. Сегодня известно несколько видов сверток.

*Эвристические свертки.* Один из наиболее распространенных приемов эвристического свертывания показателей связан с приведением их к безразмерному виду и суммированию с некоторыми (как правило, субъективно определяемыми) весовыми коэффициентами (аддитивная свертка) или перемножению с некоторыми (также субъективно определяемыми) степенями (мультипликативная свертка). Вид свертки и значения коэффициентов определяются на основе инструкции, опыта (в некоторых случаях с учетом экспертных оценок). Эти свертки часто используются в задачах выбора.

Так по Нейману [50] показатель эффективности определяется как

$$\Pi = \sum_{i=1}^n n_i ,$$

где  $n_i$  – частные показатели эффективности. По Гермейеру рекомендуется выражение

$$П = \sum_{i=1}^n \lambda_i n_i + \lambda_0 ,$$

где  $\lambda_i$  – весовые коэффициенты ( $\sum \lambda_i = 1$ ),  $\lambda_0$  – весовой коэффициент, отражающий персональное отношение ЛПР к рассматриваемой альтернативе. Для случая, когда локальные цели системы оказываются зависимыми друг от друга, рекомендуется мультипликативная форма свертки

$$П = \prod_{i=1}^n n_i^{\lambda_i} .$$

Использование таких свертки для КУБ рождает еще одну проблему – определения весовых коэффициентов.

*Экономические свертки.* Эти свертки отражают концепцию экономической эффективности и представляют собой функцию от стоимостных показателей. В простейших случаях такая свертка является разностью между выходным экономическим эффектом и затратами или частным от деления первого на второе.

*Физические свертки* отражают “физикалистский подход” к проблеме эффективности и опираются на систему физических величин, предложенную Р. ди Бартини. В этой системе в качестве основных размерных величин используются только две: длина  $L$  и время  $T$ . Все остальные величины, включая массу, представляются в виде произведения  $L^r \cdot T^s$ , где  $r$  и  $s$  – целые положительные или отрицательные числа (например: длина –  $L^1 T^0$ ; скорость –  $L^1 T^{-1}$ ; масса –  $L^3 T^{-2}$ ; сила –  $L^4 T^{-4}$ ; энергия –  $L^5 T^{-4}$ ; мощность –  $L^5 T^{-5}$  и т. д.). Таблица, построенная из таких произведений, содержит в своих клетках различные физические величины, представлен-

ные в форме, удобной для записи тех или иных физических законов. Если рассматривать их как инварианты технической системы, отражающие цель системы, то можно ими характеризовать эффективность. Например, для характеристики эффективности работы транспорта предполагалось вводить следующие варианты: масса перевезенного груза на расстояние ( $L^4 T^{-2}$ ), перевозимая масса на скорость ( $L^4 T^{-3}$ ), масса перевозимого груза на расстояние и на скорость ( $L^5 T^{-4}$ ) или на квадрат скорости ( $L^6 T^{-4}$ ). Вместе с тем не всегда можно более или менее строго обосновать объективную существенность этих комплексов.

*Функциональные свертки.* Наиболее распространенным видом функциональных сверток является вероятная свертка – вероятность превышения каждым из некоторого набора показателей соответствующего ему порогового значения. Недостатки подобного подхода применительно к КУБ проявляются в том, что необходимая для построения достоверных вероятностных оценок информация во многих случаях отсутствует.

*Смешанные свертки* строятся таким образом, что одна составная часть отражает функциональную эффективность, а другая – экономическую. Широко используемый при этом прием – деление обобщенного показателя физической эффективности на стоимость.

Поскольку понятие эффективности имеет как объективные, так и субъективные стороны, то адекватные оценки частных видов эффективности должны быть многокритериальными, а согласование противоречивых показателей (критериев) может быть произведено только на основе привлечения компетентных человеческих суждений и учета прошлого и будущего системы. Применение теории отношений предпочтения и полезности



предполагает проведение предварительного обоснования выбора показателей на основе морфологического анализа системы показателей. Набор таких показателей должен удовлетворять требованиям:

- достаточности (набор показателей охватывает всю совокупность проблем, связанных с достижением главной цели);
- необходимости (показатели не дублируют друг друга в учёте основных факторов);
- операциональности (показатели представлены по возможности количественно и понятны лицам, осуществляющим оценивание эффективности или принимающим решение);
- наличия группового свойства (обеспечивается возможность замены отдельных групп показателей обобщенными).

Если оценка эффективности управления безопасностью для какого-либо варианта КУБ с использованием функции полезности может быть проведена непосредственно, то при использовании результирующего отношения предпочтения оценка эффективности управления безопасностью осуществляется путем сравнения с некоторым эталоном, который необходимо обоснованно назначить.

1.2.3. Морфологический анализ, разработанный Ф. Цвикки [50], имеет целью выработку нового приемлемого технического решения на основе рассмотрения возможных решений, а его сущность состоит в создании новой информации об изучаемом объекте и выработке оценки всех возможных альтернатив для каждой составной части решения. При формировании функции эффективности управления безопасностью НТО ТК и

СК удобно воспользоваться той частью морфологического анализа, которая определяет центральную информацию об исследуемом объекте. По существу, эта процедура может быть названа информационной сверткой.

Система, описывающая образ КУБ, имеет информацию о нем в виде некоторой последовательности образов его свойств  $S_{A1}^0, S_{A2}^0, \dots, S_{An}^0$ , являющихся отображением реальных значений его характеристик. В процессе обработки имеющейся неполной информации и сравнительного анализа образов КУБ в системе его оценивания выявляется центральная информация  $I_{\psi}$  – некоторая общая часть различных образов последовательности  $\{S_{Aj}^0\}$  – и периферийная информация  $I_n$ , характеризующая индивидуальные особенности каждого из образов последовательности  $\{S_{Aj}^0\}$ .

В процессе морфологического анализа производится расширение периферийной информации путем дополнения совокупности признаков (элементов периферийной информации), характеризующих значения  $\{S_{Aj}^0\}$ , до совокупности всех возможных признаков (характеристик КУБ).

На основе расширенной периферийной информации строится новая последовательность  $\{\bar{S}_{Aj}^0\}$  образов возможных значений  $\{\bar{S}_{Aj}^0\}$  исследуемого объекта, включающая в себя последовательность  $\{S_{Aj}^0\}$  как подпоследовательность.

Таким образом, в модели формирования облика функции эффективности управления безопасностью НТО ТК и СК выделяются следующие операции и этапы:

1. Отображение объекта исследования (КУБ).
2. Расчленение образа КУБ на составные части.
3. Выявление общей части образов.

4. Выявление отличительных признаков каждой характеристики объекта исследования.

5. Дополнение выявленных признаков объекта иными возможными признаками.

6. Построение новых возможных характеристик объекта исследования.

Последовательность образов (свойств и характеристик) КУБ может быть задана с помощью графа «древовидной» [51] структуры. Очевидно, что такой граф является классификационным. То есть, спускаясь по графу от корня к висячим вершинам, будем последовательно получать подклассы, группы, подгруппы и т. д. показателей, на которые разбивается КУБ. Для того чтобы привести в соответствие порядок висячих вершин, необходимо выполнить перестановки отношений на уровнях графа и уровней графа, то есть выполнить ранжирование отношений (дуг) графа. Согласно [52] чем меньше число измерений отношений одного уровня классификационного графа по сравнению с другими, тем выше ранг уровня.

Такой классификационный граф является удобной функцией для аппроксимации, интерполяции и экстраполяции изменений качественных и количественных параметров и характеристик, создаваемых КУБ.

Для существующих сегодня комплексов управления сложными техническими системами накоплена определенная информация, которая формирует уровень ( $U_A$ ) отношений между отображением реальных элементов и процессов комплекса  $U_A(R_k)$ , представляющий собой упорядоченную совокупность отношений  $\{R_k\}$ , которыми может быть описан любой из образов  $\{S_{Aj}^0\}$ .

Одновременно при увеличении числа членов последовательности  $\{S_{Aj}^0\}$  выделяется центральная ин-

формация  $I_{\psi}$  об описании КУБ и периферийная информация  $I_n$  для каждого значения  $S_{Aj}^0$ , после чего производится расширение периферийной информации. Если уровень дополненных отношений  $U_A^*(R_k)$  определен, то есть строго определены тезаурус, с которым оперирует КУБ, и синтаксис построения образов  $\{S_{Aj}^0\}$ , то операция расширения периферийной информации вполне формализуема.

Полагая, что выделение периферийной и центральной информации является сверткой полной информации обо всех образах  $\{S_{Aj}^0\}$  КУБ, отметим, что развертка расширенной периферийной информации по  $I_{\psi}$  является обратной операцией и позволяет построить последовательность всех возможных значений  $\{S_{Aj}^0\}$  над уровнем отношений  $U_A^*(R_k)$ .

Построенный таким образом классификационный граф для показателей КУБ позволяет включить в известное на сегодня множество показателей даже не указанные в НТД потенциальные показатели и для всей совокупности показателей определить базовые, которые должны являться аргументами функции полезности - эффективности управления безопасностью НТО ТК и СК.

При работе с показателями возникают проблемы определения зависимостей между показателями, а также между иерархией целей и иерархией показателей, которые должны приниматься во внимание в оценке эффективности. Для решения этой задачи необходимо выполнение процедуры построения общей иерархии комплекса, а также дерева целей и задач еще не существующего комплекса, который обладает ярко выраженными известными особенностями.

Выполненный нами морфологический анализ описанных ранее требований, предъявляемых к КУБ, показал, что определяющими эффективность управления безопасностью НТО ТК и СК являются следующие показатели:

- ресурсные показатели, назначенные для КУБ ( $R$ );
- суммарные затраты на изготовление, амортизацию и эксплуатацию технических средств КУБ за время  $R - C(R)$ ;
- время реакции КУБ на фактор опасности ( $t_{реакции}$ );
- объем работы, выполняемой техническими средствами КУБ за время ее живучести, в пересчете на число операций типового набора –  $A(R)$ ;
- показатель безопасности состояния НТО ТК и СК –  $\Pi_{безоп}$ ;
- показатель наблюдаемости (распознаваемости) опасной ситуации –  $\Pi_{набл}$ .

Этот набор показателей в соответствии с аргументами функции результатов деятельности КУБ может быть разнесен по трем группам:

*Группа показателей цели:*

- время реакции КУБ на фактор опасности ( $t_{реакции}$ );
- объем работы, которую необходимо выполнить техническими, организационными и интеллектуальными средствами КУБ за время ее живучести, в пересчете на число операций типового набора –  $A_{необход}(R)$ ;
- показатель наблюдаемости (распознаваемости) опасной ситуации –  $\Pi_{набл}$ ;

- показатель безопасности состояния НТО ТК и СК –  $\Pi_{безоп}$ .

*Группа показателей ресурсопотребления:*

- суммарные затраты на изготовление, амортизацию и эксплуатацию технических, организационных и интеллектуальных средств КУБ за время  $R$  –  $C_{затрат}(R)$ .

*Группа временных показателей «бесплатного ресурса»:*

- ресурсные показатели, назначенные для КУБ ( $R$ ).

Агрегирование этих показателей, пока записанных в общем виде, приводит к следующему общему выражению показателя результата управления безопасностью для ТК и СК:

$$Y = const \cdot (\Pi_{набл} \Pi_{безоп}) \cdot \frac{A_{необх}(R)}{C_{затрат}(R)} \cdot \frac{R}{t_{реакции}}.$$

Несоответствие в размерностях этого выражения

$$\frac{[A_{необх}(R)]}{[C_{затрат}(R)]} = \frac{\text{размерность работы}}{\text{размерность стоимости работ}}$$

требованиям анализа размерностей [53] вынуждает сделать следующее замечание.

Стоимость является субъективной характеристикой всего объема работ, описывающих жизненный цикл комплекса. Она определяется рынком труда, капитала и потребностями в конечном результате деятельности КРК в целом. Очевидно, что оценивание одних и тех же целенаправленных действий и принимаемых решений многомерным вектором работ можно считать объективным показателем КУБ, в то время как стоимостные показатели определяются политическими, военно-стратегическими и конъюнктурными условиями и по-

стоянно изменяются. Хотя, по-видимому, объективно существует процедура вычисления эквивалента между работой (физической, интеллектуальной и пр.) и ее стоимостным выражением,  $C = const A$ , но для данной задачи значение этого эквивалента можно не определять, поскольку его выражение является лишь множителем в выражении функции результата и будет сокращено при вычислении показателя эффективности управления безопасностью. Таким образом, сохраняя за стоимостными показателями их весомость и значимость, приоритет в оценивании результата действий КУБ все же следует отдавать объективным аспектам как при формировании его облика, так и при создании и эксплуатации. Такой подход позволяет иметь не только объективную оценку. Вместе с тем возможен и такой подход к решению этой задачи, когда в списке требований появится параметр, характеризующий стоимость уровня опасности для НТО ТК и СК. Пока такой показатель не известен, безразмерную функцию для оценивания результата можно представить в виде:

$$Y = const \cdot (П_{набл} П_{безоп}) \cdot \frac{A_{необх} (R)}{A_{затрат} (R)} \cdot \frac{R}{t_{реакции}}.$$

В соответствии с полученными для показателя эффективности управления безопасностью свойствами и при соблюдении очевидного соотношения

$$Y < Y_{тр},$$

выражение для показателя эффективности управления безопасностью удобнее представлять со шкалой 0÷1, тогда

$$П_{упр}^{эф} = \frac{Y}{Y_{тр}}$$

и, следовательно,

$$P_{\text{упр}}^{\text{эф}} = (\bar{P}_{\text{безоп}} \bar{P}_{\text{набл}}) \cdot \frac{\bar{A}_{\text{необх}}(R)}{\bar{A}_{\text{затрат}}(R)} \cdot \frac{\bar{R}}{\bar{t}_{\text{реакции}}} \in 0 \div 1, \quad (1.1)$$

где  $\bar{P}_{\text{безоп}}$  – нормированный показатель безопасности;  $\bar{P}_{\text{набл}}$  – нормированный показатель наблюдаемости опасности;  $\bar{A}_{\text{необх}}$  – нормированный показатель необходимого объема всех видов работ (очевидно, что для достижения поставленных перед КУБ задач  $\bar{A}_{\text{необх}}=1$ );  $\bar{A}_{\text{затрат}}$  – нормированный показатель стоимостных затрат, выраженный через свой эквивалент в виде объемов реальных выполненных работ;  $\bar{R}$  – нормированный показатель ресурса КУБ;  $\bar{t}_{\text{реакции}}$  – нормированный показатель оперативности КУБ.

Учитывая, что целевые показатели КУБ ( $\bar{P}_{\text{безоп}}$  и  $\bar{P}_{\text{набл}}$ ), а также показатели  $\bar{R}$  и  $\bar{t}_{\text{реакции}}$  должны быть обязательно достигнуты, единственным варьируемым параметром является затратная часть этого выражения ( $\bar{A}_{\text{затрат}}$ ), расходуемая на достижение цели. Отсюда следует смысловое содержание критерия эффективности  $K(s)$  как определяющего правила для выбора стратегии построения комплекса.  $K(s)$  – оптимизации процессов достижения фиксированной цели, а в качестве критерия оптимальности может быть выбран наибольший средний результат

$$K : X \rightarrow V; X^f \subseteq X; K(s) \in X^f; K(s) \geq K(S); S \in X^f.$$

Таким образом, определилась стратегия  $(s)$  построения комплекса –  $s^* \in S$  – минимальное ресурсопотребление для достижения цели.



Полученное здесь выражение (1.1) обладает рядом полезных свойств:

Это выражение позволяет оценивать эффективность управления безопасностью КУБ в целом, вместе с тем оно успешно справляется с задачей оценивания эффективности его отдельно взятых элементов.

Полученный показатель эффективности в полной мере приемлем для оценивания технической, организационной и кадровой составляющих КУБ.

### **1.3. Применение системного подхода к обоснованию облика комплекса управления безопасностью**

Входящее в состав КРК НТО ТК и СК представляет собой сложные комплексы, взаимодействующие и функционирующие с одной целью – подготовка и пуск РКН. Эти компоненты КРК обладают многими свойствами, среди которых не последнее место занимает безопасность их функционирования. В последнее время предпринято много попыток обеспечить безопасность для НТО ТК и СК. Как показывает практика применения КРК, движение к обеспечению безопасности его функционирования ранее проводилось в основном по ведомственному принципу. Ракетно-космическая промышленность (Роскосмос) уделяла больше внимания проектно-производственному аспекту в обеспечении безопасности, а Минобороны (Космические войска) – вопросам организации безопасной эксплуатации. Разделенные ведомственными интересами эти подходы были недостаточно согласованы, а потому малоэффективны (рис. 1.5).

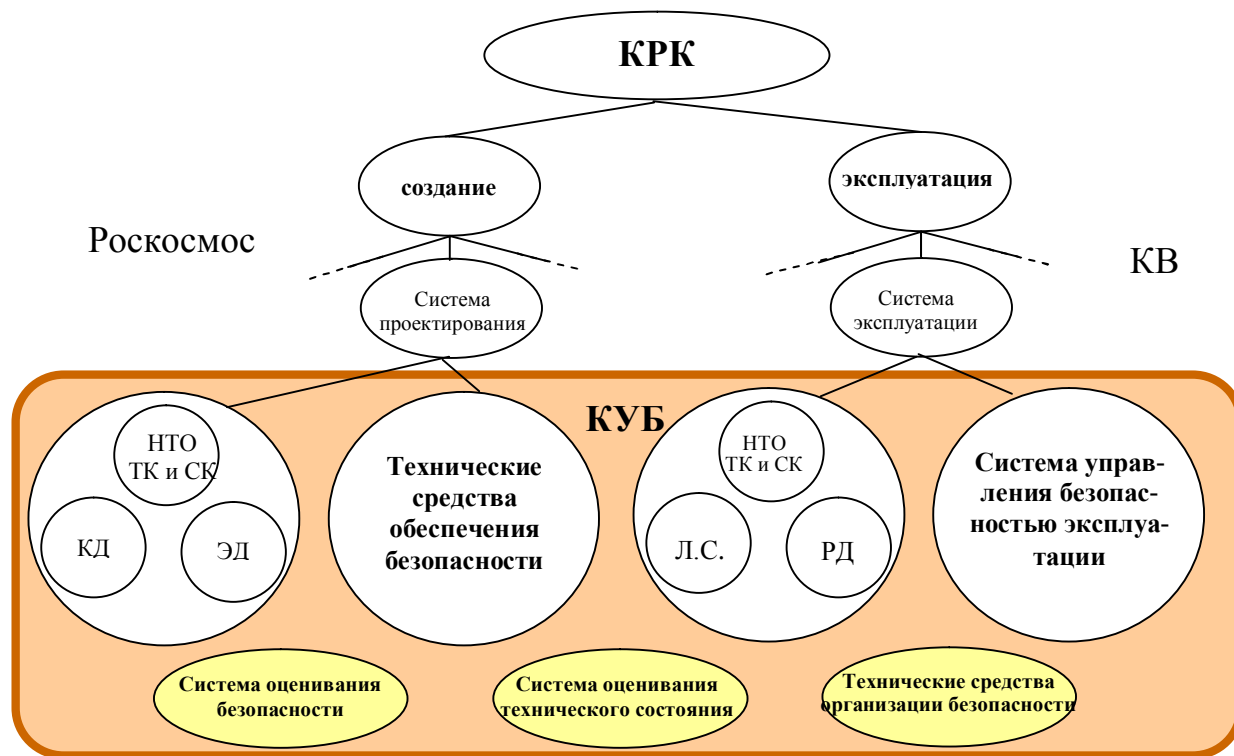


Рис. 1.5

Предлагается реализовать единый подход к обеспечению безопасности функционирования КРК. Такой подход содержит технические, организационные и кадровые компоненты, объединенные единой целью – активно воздействовать на безопасность НТО ТК и СК на всех стадиях их жизненного цикла.

«Механическое» объединение указанных выше компонентов не может дать желаемого результата. Положительный результат такого объединения возможен при условии формирования новой комплексной структуры, именуемой в настоящей монографии как комплекс управления безопасностью (КУБ). Кроме всего прочего, для этого сложились благоприятные условия, связанные с привлечением организаций ракетно-космической промышленности к выполнению полного комплекса задач по эксплуатации НТО ТК и СК, разработанного и изготовленного этими организациями. Практически десятилетний период (с 1998 года) привлечения разработчиков и изготовителей НТО ТК и СК к эксплуатации не только отечественных КРК, но и международных («Морской старт») создал все необходимые и достаточные предпосылки для продвижения вперед на пути повышения безопасности функционирования КРК.

Совершенно очевидно, что КУБ обладает всеми признаками сложности больших систем и подлежит при его создании и эксплуатации обязательному рассмотрению с позиций системного подхода как к сложным системам.

Для КУБ системный подход содержит разработку как минимум следующих положений:

- системной концепции (принимаемой для каждой сложной системы);

- шести общепринятых системных принципов:
  - 1) системности (*примата целого над деталями*);
  - 2) иерархического строения (*наличия связи целого и частей*);
  - 3) декомпозиции и агрегирования (*допускающих членение и соединение*);
  - 4) функциональности (*выявления особенностей функций элемента*);
  - 5) полноты (*выявления структуры, функций и параметров по каждому объекту*);
  - 6) останова (*рационального ограничения в декомпозиции*).
- специальных принципов (*подлежащих формированию и учитывающих специфику исследуемого объекта*);
- системы оценивания (*с критериями и показателями свойств КРК и его качества в целом*);
- системы предпочтений – критериев по выбору рационального варианта.

Системный подход опирается на шесть общих принципов, для исследования и обоснования облика большинства сложных систем.

**1. Принцип системности** применительно для КУБ проявляется в том, что для него можно сформулировать единую глобальную цель – управление безопасностью НТО ТК и СК и определить целевой объект (объект управления – НТО ТК и СК и обслуживающий их персонал).

В работе предлагается следующая формулировка глобальной цели КУБ: эффективное управление безо-

пасностью НТО ТК и СК, обеспечивающего заданный уровень безопасности их функционирования.

Глобальная цель достигается при выполнении главных целей, взаимосвязанных в многоуровневое дерево целей и задач. Так же как и глобальная, главные цели и цели более низких уровней рассматриваются с позиции эффективности управления безопасностью, записанной в канонической форме (интегральный эффект, ресурсы, время).

В связи с этим в состав КУБ при его системном формировании должны входить объекты, обеспечивающие достижение глобальной цели. Как сложная система КУБ связан с объектами инфраструктуры КРК (здания, сооружения, комплекс энергоснабжения, транспортные сети и др.) и природной средой (грунт, флора и фауна, климатические условия и др.).

Представление КУБ как сложной системы связано с динамическими явлениями в технике и обслуживающем персонале. Это приводит к необходимости описания КУБ соотношениями, в которых фактор времени играет существенную роль.

Функционирование и изменение свойств КУБ как сложной системы происходит в зависимости не только от воздействий системы управления технологическими операциями подготовки и пуска РКН, но и от воздействий условий внешней среды. Примером такого воздействия можно считать влияние стабильности работы энергосистемы КРК на качество работы управляющих электронных машин в контуре управления КРК, влияние погодных условий, в частности ветра, на технологические операции, в которых участвуют подвижные агрегаты. Примат внутренних закономерностей над внешними проявляется, в частности, в том, что для парирования неблагоприятных воздействий внешней среды

следует в первую очередь изменять внутренние свойства самого комплекса.

**2. Принцип иерархического строения** применительно к КУБ реализуется тем, что КУБ может быть представлен в виде иерархической схемы. В структуре комплекса имеют место разнообразные связи (вертикальные, горизонтальные, физические, функциональные, энергетические, информационные, материальные и др.).

**3. Принцип многомодельности** предполагает использование для познания и исследования комплекса разнообразных моделей, отражающих различные свойства и аспекты системы, и совместных исследований на этих моделях. Для КУБ это функциональные, структурные и параметрические модели.

**4. Принцип системного научного объяснения** предполагает противопоставление «редукционного» объяснения системному. Редукционный принцип допускает возможность сведения свойств целого к свойствам первичных элементов, а системное объяснение опирается на учет взаимодействия целого и частей с приоритетом целого. Для КУБ этот учет реализуется процедурами агрегирования его моделей и характеристик с учетом вертикальных и горизонтальных связей элементов.

**5. Принцип сочетания детерминизма и антидетерминизма** требует учитывать при формировании облика КУБ жесткую обусловленность строения и поведения, а также неопределенность в оценке возможности возникновения тех или иных опасных событий.

**6. Принцип антиинтуитивизма** требует при использовании интуитивных суждений отдельных людей их проверки методами экспертных оценок в сочетании с

многомодельными исследованиями. Это особенно важно при формировании КУБ, когда человеческий фактор играет одну из значимых ролей.

Уяснение принципов системного подхода и к формированию КУБ позволяет приступить к рассмотрению проблематики системного анализа и системотехники – важнейших для практики направлений использования системного подхода.

Как следует из сформулированных принципов, многоуровневая декомпозиция может проводиться неоднозначным образом из-за возможности выбора принципа разбиения.

Функциональное агрегирование известных на сегодня процессов воздействия на технологический процесс подготовки и пуска РКН (рис.1.6) позволяет выявить наиболее общие процессы и по-новому выполнить декомпозицию структуры КУБ, призванной решать проблему обеспечения безопасности для НТО и ТК в комплексе, учитывая все этапы их жизненного цикла, начиная с формирования ТТЗ на КРК и заканчивая его утилизацией.

Предложенная иерархия отражает тот важный факт, что КУБ сам входит как компонент в состав КРК, т.е. более крупной целостной системы. Системы верхнего уровня составляют целевые объекты НТО ТК и СК, а элементами первого уровня являются обеспечивающие системы. Третий уровень иерархии включает технические, технологические и организационные средства управления безопасностью. Следующий уровень включает элементы управления безопасностью, имеющие существенные физические особенности. В свою очередь последний уровень иерархии составляют окончательные элементы контура управления безопасностью.



Рис.1.6



Одним из центральных элементов системного подхода к формированию сложных технических систем является системный анализ. Системный анализ относится к блоку прикладных системно-кибернетических знаний наряду с прикладной кибернетикой и информатикой. Каждое из этих прикладных направлений использует принципы соответствующего подхода, хотя некоторые положения являются общими в силу взаимосвязи аспектов. Так, в КУБ как сложной системе весьма существенными являются управленческие аспекты, от которых зависит выбор поведения системы. Весьма существенным при функционировании НТО ТК и СК является и информационный аспект, особенно в системах автоматизированного контроля и управления.

Основными элементами, характерными для системного анализа КУБ, являются:

**1) Цели.** Целевой подход занимает центральное место в системном анализе. В задачах создания КУБ системный анализ начинается с выявления цели, которая должна быть достигнута создаваемым комплексом.

Эта цель, как правило, формулируется из анализа назначения и требуемых свойств системы более высокого порядка, т.е. КРК. В результате этого анализа определяются характеристики требуемого уровня безопасности НТО ТК и СК. В дальнейшем формулируется глобальная цель КУБ как обеспечение назначенного уровня безопасности процессов функционирования ТК и СК. Далее глобальная цель путем ее деления позволяет получить подчиненные ей главные цели для элементов последующих уровней иерархии.

Выполненная с помощью общих системно-технических принципов процедура декомпозиции технических и организационных воздействий, выполняемых сегодня для обеспечения безопасности ТК и СК, их

агрегирование в общую систему иерархии КУБ, а также формализованная цель позволяют построить дерево целей и задач КУБ (рис 1.7). Для КУБ главными целями являются: оценивание безопасности, нормирование уровня безопасности и управление текущим значением показателя безопасности.

Формальная постановка общей задачи обоснования облика КУБ должна строиться на реально существующих и потенциально достижимых вариантах реализации главных и подчиненных им целей нижних уровней. Так, в системе принятия решения и оценивания вариантов КУБ должны рассматриваться допустимые варианты реализаций таких процессов, как:

- определение достаточного множества мест для измерения опасных факторов, сопровождающих процессы эксплуатации НТО ТК и СК;
- определение комплекса измерительных средств, контролирующих техническое состояние НТО ТК и СК;
- сбор информации о техническом состоянии НТО ТК и СК;
- хранение и обработка информации о техническом состоянии НТО ТК и СК;
- создание динамической и достоверной документации о действующих комплексах НТО;
- создание математического обеспечения процессов эксплуатации НТО ТК и СК;
- формирование множества технических средств локализации и подавления действий опасных факторов;
- создание организационной структуры управления кадрами обслуживающего НТО ТК и СК персонала.



Рис. 1.7

В сложных задачах системного анализа, решение которых зависит от многих взаимосвязанных элементов, целесообразным является дальнейшее развертывание главных целей в многоуровневую систему (дерево) целей и задач вплоть до назначения элементов в соответствии с иерархией комплекса.

**2) Ограничения (ресурсы).** Задачи системного анализа решаются в условиях различного рода ограничений, накладываемых обстановкой, в которой должно быть реализовано принимаемое решение. Важнейшими видами ограничений при создании КУБ являются ресурсные ограничения (стоимость, затраты энергии, количество обслуживающего персонала), временные (оперативность, быстроедействие и пр.), а также ограничения по условиям эксплуатации (климатические, технологические, экологические, наличие или отсутствие целенаправленного воздействия других систем и пр.) Ограничения также должны задаваться КРК.

**3) Альтернативы или варианты принятия решения.** В процессе системного анализа должны быть выявлены допустимые (с учетом введенных ограничений) альтернативы и выделены лучшие из них с какой-либо точки зрения. Особую важность имеет вопрос обоснования множества сформированных вариантов. Их генерация может потребовать сложных процедур функционального и структурного синтеза и анализа на различных уровнях иерархии.

**4) Критерии – правила, по которым осуществляется сравнение и выбор вариантов.** В качестве критерия выбора часто выдвигаются условия принадлежности варианта к множеству, обладающему определенными свойствами, или достижение при этом варианте экстремума по некоему показателю предпочтения. Так, по-

казателем пригодности какого-либо варианта структуры или функционального облика КУБ является возможность достижения объектом заданной цели в рамках сформулированных ограничений. Примерами показателей предпочтений могут служить: максимальная надежность, минимальные затраты ресурсов и др. В исследовании операций критерий сравнения или набор критериев считается заданным. В системном анализе применительно к КУБ определение состава критериев предпочтений, показателей и определение правила их согласования (нахождения компромисса между ними) является одной из основных исходных задач предлагаемого исследования. Полное раскрытие процедуры оценивания для КУБ удастся получить лишь после формирования уровня предпочтений, в результате чего определяется набор определяющих параметров, стратегия, функция результата, критерий и показатели эффективности управления безопасностью.

**5) Модели.** Исследование альтернатив и соответствующих им показателей производится на моделях. При формировании КУБ возникает необходимость привлечения не одной модели, а их комплекса и проведения с использованием этих моделей многокритериального анализа и синтеза (это также отличительная черта системного анализа от традиционного подхода к исследованию операций). Типичной задачей анализа является исследование характеристик вариантов КУБ, а типичная задача синтеза состоит в генерации его конкурентоспособных вариантов и выборе предпочтительного варианта из множества допустимых.

**6) Рекомендации.** Это заключительная часть системного анализа, содержащая выводы из проведенного исследования и указания по реализации его результатов.

Системный анализ КУБ осуществляется в несколько этапов. Исходным этапом является постановка задачи и анализ целей. Этапу постановки задачи может предшествовать этап ретроспективного анализа, на котором анализируется прошлое, в частности проблемы, имеющие сходные черты с решаемой проблемой.

Примерами результатов ретроспективного анализа, воплощенных уже в настоящее время в жизнь, являются следующие решения. Анализ последствий аварийных ситуаций в КРК привел к выводу о том, что одной из основных причин гибели личного состава эксплуатирующих подразделений является их присутствие на СК во время проведения операций по подготовке РКН к пуску. В результате специалистами КБТМ была сформулирована концепция «безлюдных» стартов, реализованная частично на комплексах «Циклон-2» и «Циклон-3», а в полной мере – на комплексе «Зенит» (ныне модернизированном КРК «Зенит-М»). Такой подход позволил при аварии РН «Зенит» на начальной стадии полета, падении заправленной РН на пусковой стол и полном выводе из строя стартового комплекса «Зенит» избежать человеческих жертв.

В результате выполнения первого этапа формулируется модель (дерево) целей и задач для КУБ и его элементов различных уровней.

Второй этап состоит в анализе ограничений, зависящих от условий, в которых создается и функционирует КУБ, в результате чего формируется комплекс ограничений, выполнение которых позволяет отнести вариант облика КУБ к конкурентоспособным.

Весьма важным этапом системного анализа КУБ является формирование критериев выбора (предпочтения) исходя из требований к его свойствам.

Наиболее важным конструктивным этапом является формирование вариантов (альтернатив) на основе ретроспективного, морфологического и экспертного анализа, а также использования теоретических методов синтеза. Полученное множество вариантов подвергается далее многомодельным исследованиям, в результате которых из множества вариантов выбирается предпочтительный, формулируются требования для проведения следующих этапов его реализации.

В общем случае системный анализ проводится итерационно, путем повторения процедур анализа с последующим уточнением и согласованием необходимых факторов, которые могут быть выявлены только в ходе анализа.

#### **1.4. Концептуальные положения для обоснования облика комплекса управления безопасностью**

1.4.1. Системная концепция создания и оценивания КУБ. Неопределенность компонентов модели, при формировании облика КУБ приводит к необходимости рассмотрения задачи принятия решения о его синтезе с позиции системного подхода, т.е. проведения исследования по последовательно убывающим уровням обобщения с учетом комплекса межуровневых и внутренних взаимосвязей.

Верхним уровнем принятия решения по синтезу КУБ является концептуальный. На нем осуществляется принятие решения относительно целей функционирования комплекса. Он обеспечивает выявление логики процессов управления безопасностью функционирования НТО ТК и СК. На основе надежной информации,

носящей, как правило, качественный характер, на этом уровне вскрывается общая структура предпочтений.

На среднем, операционном уровне выполняется синтез функциональной структуры систем КУБ и принимается решение по формулированию требований к его элементам.

Детальный уровень решает задачи инженерного синтеза и предполагает анализ качеств элементов подкомплекса.

Цели и задачи каждого уровня вертикальной декомпозиции проблем создания КУБ могут быть решены лишь в том случае, если имеется некоторое общее свойство, по которому объекты рассматриваемого уровня принятия решения различаются по предпочтительности с точки зрения оперирующей стороны. Таким общим свойством является концепция проведения операций управления безопасностью функционирования НТО ТК и СК (стратегия применения его активных средств).

Методология обоснования КУБ должна строиться на основе конкретизации общесистемных методологических основ с учетом особенностей этой сложной системы. Основными составляющими специализированной методологии для КУБ должны являться:

- единая **СИСТЕМНАЯ КОНЦЕПЦИЯ**, объединяющая различные части комплекса, многообразие процессов и явлений при создании и функционировании комплекса как единой системы;
- **ПРИНЦИПЫ** внешнего дополнения, обеспечивающие исключение субъективизма, вызванного произволом в выборе критерия эффективности КУБ.

Как специфически сложная система КУБ отличается от других сложных систем наличием множества следующих основных особенностей.



Чрезвычайно высокая ответственность целевого назначения КУБ. Срыв в достижении цели грозит, как правило, людскими, экономическими и политическими потерями стратегического масштаба.

Многообразие физической природы агрегатов и систем, входящих в состав НТО ТК и СК (наземный транспорт, грузоподъемные механизмы, системы для преобразования параметров жидких и газовых сред различного химического состава, системы переработки информации и различных видов энергии), и значительный по результатам воздействия на конечную цель человеческий фактор. Чрезвычайно высокая энергетическая насыщенность НТО ТК и СК приводит к тому, что в аварийных ситуациях возникают весьма серьезные последствия в виде разрушения техники, поражения и гибели персонала, вредных воздействий на окружающую среду.

Это порождает большие трудности в формировании облика КУБ на фундаменте какой-либо одной научной отрасли. Поэтому создание КУБ должно выполняться на позициях системотехнического подхода, с включением в состав разработчиков не только специалистов-проектантов, но заказчиков, которым предстоит эксплуатировать комплекс.

Рассматриваемый КУБ как объект системотехники и как объект моделирования является многоаспектным. Это требует применения разнообразных математических моделей, отражающих структурные, функциональные, информационные, организационные и другие связи, характеристики и факторы. Для описания и исследования перечисленных аспектов используются различные модели и методы. Так, для функционального описания элементов сложных систем используются модели автоматов, динамических звеньев систем автоматического

регулирования, для описания организационных систем – модели активных элементов. Структурные аспекты исследуются моделями графов и сетей, для изучения динамики функционирования формируются специальные имитационные модели.

Вместе с тем совместное исследование всего многообразия факторов при создании КУБ, а особенно при его автоматизированном проектировании, связаны с необходимостью разработки обобщенных и универсальных многоуровневых математических описаний составляющих элементов комплекса как объектов проектирования, производства и эксплуатации. Такие описания должны представлять собой комплекс информационно и алгоритмически взаимосвязанных показателей элементов и систем различных уровней иерархии, таких как:

- математические модели, отражающие как статические взаимосвязи элементов, так и динамику их взаимодействия;
- процедуры анализа, синтеза и расчета показателей КУБ и его частей.

Такое унифицированное описание возможно при использовании единой системной концепции, неизменной для различных уровней детализации и целей исследования. В этом случае наиболее естественно соблюдается первый принцип системного подхода (принцип системности) и устанавливаются алгоритмические и информационные связи между моделями разнородных совместно функционирующих объектов.

В качестве координирующей основы исследования иерархии и аспектов КРК предлагается **Концепция управляющей системы.**

При этом под управляющей системой понимается объект, оказывающий целенаправленное воздействие на другой объект, называемый управляемым, для перевода последнего в требуемое состояние.

Такая трактовка вполне согласуется с особенностями строения и функционирования комплекса управления безопасностью НТО ТК и СК. Действительно, назначение КУБ состоит в формировании безопасных технологий подготовки и пуска РКН, создании агрегатов и систем НТО ТК и СК, обладающих назначенным уровнем безопасности, организации безопасной эксплуатации и контроле состояния НТО ТК и СК. В этом случае роль управляющей системы играют активные средства КУБ, выполняющие и обеспечивающие сбор и обработку информации о техническом состоянии НТО ТК и СК, о появлении опасных факторов при их эксплуатации и снижающие их действие до приемлемого уровня.

Каждый из элементов КУБ является управляющей системой по отношению к НТО ТК и СК, обслуживающему персоналу, реализующему технологический процесс, а также к информационному обеспечению жизненного цикла НТО ТК и СК в виде нормативной, рабочей, конструкторской, эксплуатационной и научно-технической документации.

Реализация концепции управляющей системы для многоуровневого моделирования КУБ связана в первую очередь с описанием состояний объектов управления и воздействий со стороны управляющей системы.

Достижение целей функционирования КУБ требует выполнения определенного комплекса организационно-технологических функций, характерных для всех управляющих систем. В частности, для изменения состояния объекта управления необходимо: оценить состояние объекта управления (функция контроля); сфор-

мировать закон управления (функция принятия решения); реализовать управление в виде физического и руководящего воздействия на объект управления.

В соответствии с этим управляющая система должна содержать средства контроля и принятия решения, а также исполнительные органы. Учитывая особенности КУБ, связанные с наличием ярко выраженных технических и человеческих факторов, целесообразно дополнить традиционную для информационно-управляющих систем схему компонентой, выполняющей функцию снабжения перечисленных компонентов материалами (для восстановления израсходованных при функционировании материальных ресурсов), энергией (для обеспечения работоспособности и создания управляющих физических и химических воздействий), а также результатами диагностирования и прогнозирования появления и развития опасных факторов. Структурная схема управляющей системы применительно к КУБ приведена на рис.1.8.

Каждый из перечисленных элементов этой схемы в свою очередь может представляться как система для элементов следующего уровня детализации. Согласование управляющих систем различных уровней обеспечивается в процессе их декомпозиции и агрегирования.

Однако при выбранной концепции начиная с третьего уровня возникают проблемы по следующим аспектам:

- декомпозиция управляющего воздействия между элементами управляющей системы;
- определение количества элементов в управляющей системе, т.е. определение состава оборудования для сбора и обработки информации;

- обоснование порогового значения уровня опасности;
- определение способов распознавания и развития опасности;
- выбор управляющего воздействия (выбор технологии для снижения опасности).

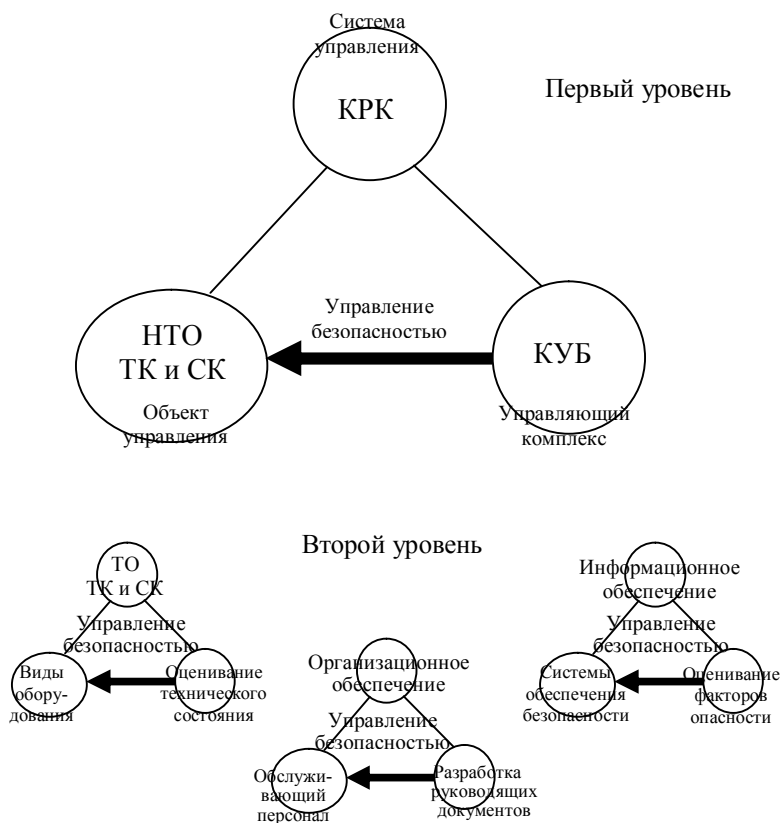


Рис. 1.8

Обобщенным динамическим свойством для концептуального уровня принятия решения является «потенциальная эффективность управления безопасностью» создаваемого КУБ. Это понятие отражает то обстоятельство, что при принятии решений, направленных на оценку принципиальной приемлемости той или иной концепции управления безопасностью, на установление возможных стратегий ее реализации, используется лишь наиболее агрегированная информация качественного характера.

Потенциальная эффективность процесса управления безопасностью отражает способность активных средств КУБ решать поставленную задачу. Оценка потенциальной эффективности управления безопасностью в общем виде заключается в вынесении суждения о степени достижения цели операции при идеальном способе использования активных средств.

На концептуальном уровне принятие решения задается достаточно нечетко. «Идеальную» точку исхода обычно устанавливают на «бесконечности», а для задания отношения предпочтения используют либо критерий оптимальности, либо критерий адаптивности. Использование этих критериев предполагает получение достаточно «сильной» информации, позволяющей «свернуть» частные характеристики исхода в некоторую скалярную функцию. Если информации для получения обобщенного показателя недостаточно, то строится решающее правило (составной критерий) на основе качественной информации.

Если альтернативная концепция «сильно» доминирует, то она будет доминировать и на остальных, нижележащих уровнях.

На концептуальном уровне можно оценить только потенциальную степень достижения цели комплекса

применительно к той или иной концепции его проведения. На операционном уровне может быть оценена степень выполнения частных задач функционирования комплекса, а на детальном уровне – степень соответствия качества элементов предъявляемым к ним требованиям.

1.4.2. Специальные принципы обоснования облика КУБ. Создание КУБ является процессом, направленным на достижение заданного уровня безопасности подготовки и пуска РКН. Требования к эффективности управления безопасностью подготовки и пуска РКН до сих пор не формулируются в требованиях к КРК в целом. Однако общие суждения о безопасности функционирования НТО ТК и СК, как правило, высказываются на словесном уровне, что приводит к проблемам записи выражения для общего показателя безопасности, показателя эффективности управления безопасностью процессов функционирования НТО ТК и СК, т.е. к проблемам построения алгоритмов их вычисления.

Эта проблема может быть решена, если оценивать эффективность управления безопасностью создаваемого КУБ по значениям некоторого набора частных показателей, непосредственно дополняющих критерий эффективности управления безопасностью и призванных детализировать его.

**1. Принцип:** Неизбежности опасных ситуаций для эксплуатации НТО ТК и СК. Мировой и отечественный опыт эксплуатации КРК показал несостоятельность применения концепции «абсолютной безопасности», что отразилось на развитии и широком применении концепции «приемлемого риска», сформулированной в отношении эксплуатации опасных производственных объектов [54, 55]. Поэтому дальнейшее формирование

КУБ, представленное в данной работе, строится на применении принципа неизбежности появления и необходимости и возможности управления развитием опасных ситуаций.

Введение этого принципа для формирования КУБ приводит к необходимости рассмотрения следующих положений:

- семантики опасности и безопасности;
- причин появления опасных факторов и процессов их развития;
- выявления множества направлений воздействия на опасные факторы и определения эффективных способов управления процессами развития опасных ситуаций;
- описания уровней опасности и процедур их оценивания;
- нормирования допустимых уровней опасности.

**2. Принцип:** КУБ должен обеспечить равную безопасность реализации всех технологических процессов.

Комплекс управления безопасностью должен быть предопределенным. Можно привести систему доводов, показывающих, что любая корректно определенная система должна быть предопределенной и что отсутствие предопределенности проистекает из недостатка информации о самой системе [46]. Недостаток информации следует по возможности устранять.

Реализация этого принципа сводится к выявлению наиболее опасных технологических операций, изучению физических и химических процессов, протекающих при их выполнении. Такие процессы, с одной стороны, нежелательны, а с другой, если они неизбежны в цепи подготовки и пуска РКН, – должны подробно исследо-



ваться. Примером такой технологической операции может служить пуск РКН. Это утверждение следует из того, что:

- в действующей НТД даже не существует сформулированного понятия пуска, хотя, по-видимому, пуск – это технологический процесс, характерный наличием взаимного влияния пускового оборудования СК и РКН, начинающийся с необратимых процессов в РКН и заканчивающийся свободным управляемым движением РКН по трассе выведения;

- пусковые процессы и нагрузки до сих пор изучены недостаточно. Поэтому в состав пускового оборудования входят системы штатных измерений, которые измеряют, фиксируют и хранят информацию о силовых, тепловых и акустических процессах взаимодействия РКН и пускового оборудования;

- акустические нагрузки пусковых процессов практически не имеют математического описания. Основная причина такого положения – отсутствие теории аэроакустики сверхзвуковых струй;

- парирование пусковых нагрузок привело к созданию систем охлаждения, которые до сих пор также строятся на малоизученных полуэмпирических наблюдениях фазовых переходов в многофазных нестационарных потоках.

Согласно принятому здесь первому принципу в интересах обеспечения безопасности следует проводить глубокие научные исследования процессов пуска, а также опытно-конструкторские работы по другим эксплуатационным процессам.

**3. Принцип:** Абсолютной ценности человеческой жизни. При исследовании свойств КУБ неизбежно всплывает человеческий фактор.

Влияние на безопасность НТО ТК и СК человеческого фактора двоякое. Во-первых, нам представляется, что не существует морально-этических оправданий в возможности проектирования технических объектов, для которых допустимы процессы, наносящие вред здоровью как обслуживающего персонала, так и жителей регионов, где дислоцированы такие объекты, и тем более недопустима возможность гибели людей. Вместе с тем процессы эксплуатации НТО ТК и СК могут быть опасными для обслуживающего персонала. Причина этого кроется в том, что большинство компонентов НТО ТК и СК являются «человеко-машинными». Человеку в этих системах принадлежат важнейшие функции управления элементами и режимами функционирования системы, обработки информации, принятия решений и выдачи команд. Как показывает статистика процессов функционирования «человеко-машинных» систем [56÷59], до 90 % отказов в них происходит по вине обслуживающего персонала.

Именно поэтому особое внимание при формировании облика КУБ следует уделять операторской деятельности, и это является вторым оправданием в принятии этого принципа.

1.4.3. ТТЗ и обоснования облика КУБ не позволяют полностью формализовать все процедуры раскрытия имеющихся проблемных ситуаций. Поэтому исследование эффективности управления безопасностью НТО ТК и СК требует решения ряда сложных проблем, связанных с выявлением и измерением предпочтений и построением модели предпочтений.

Под предпочтением понимают любую форму упорядочения имеющегося множества элементов  $M$  и устранения неопределенности в выборе некоторого эле-

мента  $t^* \in M$  или некоторого подмножества  $M^* \in M$ . Для КУБ на этапе обоснования его облика выявлению предпочтений подлежат:

- общая структура КУБ (количество элементов и способы связей между ними);
- структура организации информационных потоков в КУБ;
- функции технических средств КУБ в их взаимодействии с НТО ТК и СК;
- техническая и организаторская деятельность КУБ по управлению безопасностью процессов подготовки и производства пуска.

Для КУБ предпочтения, как правило, распространяются не на отдельный элемент, а на возможные подмножества вариантов его реализации.

Формально задача выбора ставится в виде:

$$\langle M, K, M^* \rangle,$$

где  $K$  - решающее правило выбора.

Известны [60, 61] две постановки задачи по выявлению предпочтений:

1. Предпочтение строится на основе информации о ранее принятых решениях в реальных ситуациях выбора. Такая постановка оправдана, когда ситуация выбора может повторяться многократно в неизменных условиях. По существу, в отношении к КУБ ее можно назвать принципом выбора «от достигнутого». Поскольку в структурах КРК до сих пор в полной мере не существовало таких компонентов, как КУБ, то такое правило для определения приоритетов КУБ неприемлемо.

2. Второй вариант правил предпочтений строится по опросу, т.е. с использованием экспертных оценок. Этот подход, по существу, повторяет первый и может использоваться в безвыходных ситуациях.

## 1.5. Математическая модель комплекса управления безопасностью на операционном уровне

Задача математического описания процессов функционирования сложного и еще не созданного комплекса, такого как КУБ, представляется очень непростой. Основная проблема в формализации его работы состоит в крайней недостаточности исходной информации на этапе его создания. Исходным положением такого описания может быть предположение, что функционирование наземного комплекса КРК имеет некое начальное состояние с удовлетворяющим нас значением показателя безопасности ( $P_{\text{безопасн}}^{\text{начало}}$ ). Функционирование наземного оборудования КРК происходит по некоторому алгоритму, в конце которого нам необходимо (посредством КУБ) привести его к состоянию, когда значение показателя безопасности ( $P_{\text{безопасн}}^{\text{конец}}$ ) не превышало бы некий назначенный нами уровень. При этом смена состояний НТО ТК и СК должна протекать так, чтобы текущее значение показателя безопасности не превышало бы назначенный уровень безопасности.

Поэтому целью такой математической модели являются ответы на такие вопросы, как:

1. Возможно ли создать комплекс, который обеспечил бы реализацию наших желаний по эффективному управлению безопасностью функционирования НТО ТК и СК? Такая задача в терминах теории систем называется реализацией пространств состояний.

2. Если такая реализация КУБ возможна, то на основе каких математических соотношений такой комплекс должен быть построен?

Замечание. Задача математического описания КУБ в традиционном для инженерной практики виде здесь, на операционном уровне, не ставится и не решается. Такое описание может быть получено лишь после завершения многократной череды процедур синтеза и анализа КУБ, которые итерационно уточняют его облик.

Используя для обоснования облика КУБ концепцию управляющей системы, математическую формализацию процесса его функционирования можно рассмотреть с позиций теории систем.

Потенциальные составляющие процесса функционирования КУБ имеют разную физическую природу, но описываются системами дифференциальных уравнений. В то же время логические и информационные процессы, протекающие в нем, также имеют техническую реализацию, и они могут быть описаны математическими закономерностями.

Все процессы, которые могут быть сегодня использованы для формирования процессов функционирования КУБ, можно представить пооперационной математической моделью, в общем случае в виде нелинейных дифференциальных уравнений, составляющих потенциальные пространства состояний и технологических процессов для КРК с различными значениями показателя безопасности.

Поскольку все процессы из их потенциального множества могут быть представлены в виде функций от времени, то полный (постоянно пополняющийся новыми достижениями науки и техники) набор уравнений с переменными параметрами представляет собой систему дифференциальных уравнений.

Объединение этих уравнений в единую целенаправленную математическую систему возможно, поскольку процесс управления безопасностью НТО ТК и

СК един, что позволяет создать математическую модель функционирования комплекса. Исследование этой модели позволяет оценить ее желаемую реализуемость.

При введении для КУБ обобщенной координаты состояния  $\xi$  как некоторой гладкой функции времени  $\xi(t)$  совокупность возможных к реализации процессов, составляющих банк возможных алгоритмов управления безопасностью, можно записать в виде потенциальной модели процесса функционирования КУБ как системы из  $i$  уравнений

$$F_i(w_i, w_i, \dots, w_i^{(k)}, \xi, \xi, \dots, \xi^{(k)}, t) = 0, i = 1, \dots, l; w_i \in R^q, \xi \in R^s \quad (1.2),$$

где  $w_i(t)$  - переменные, характеризующие изменение внешних параметров комплекса из  $R^q$  и состояний из  $R^s$  соответственно. Здесь  $q$  - мерный вектор внешних параметров, а  $s$  - мерный вектор состояний.

Со всей очевидностью можно утверждать, что КУБ должен реализовывать некий рациональный алгоритм, при котором его ресурсное обеспечение было бы минимальным, а безопасность процессов функционирования НТО ТК и СК максимальной.

Математическая постановка задачи поиска оптимального алгоритма управления безопасностью НТО ТК и СК сводится к отысканию минимального множества состояний комплекса с заданным уровнем безопасности и переходов между ними, отвечающих назначенным ранее ограничениям по значению показателя безопасности.

Состояния, которые должны пройти элементы НТО ТК и СК, связаны между собой последовательностью физических процессов, составляющих суть технологического процесса, реализуемого КРК. При обосновании потенциального процесса управления безопасностью необходимо найти минимальную реализацию пе-

переходов из одного состояния безопасности в другое. Само понятие параметрического «состояния» является одним из базовых в теории систем и теории автоматического управления. В общем случае под ним понимается совокупность признаков, характеризующих рассматриваемый объект с определенной точки зрения. Развитие этого понятия идет от выявления первоначальных, качественных признаков к их точной количественной оценке. Понятие «состояния» системы должно дать возможность единственным образом вычислить значения переменных, характеризующих систему, для различных моментов времени по некоторым исходным данным. Так возникает задача, связывающая понятие «состояние» с условием единственности поведения исследуемого объекта.

В общем виде КУБ характеризуется переменными входных и выходных переменных  $x_1$  и  $x_2$ . Его свойства в самом общем виде могут быть записаны в виде математического выражения типа

$$F(x_1, x_2)=0.$$

Такое представление называется неориентированным. Это же выражение можно представить в виде

$$x_1=f_1(x_2) \tag{1.3}$$

или

$$x_2=f_2(x_1), \tag{1.4}$$

т.е. придав ему различную ориентацию «вход – выход» (1.3) или (1.4). Тогда описание КУБ становится ориентированным.

В практике эксплуатации систем мы всегда стараемся иметь дело с ориентированным объектом, четко выделяя вход  $U\{u_i\}$  и выход  $Y\{y_i\}$ . В этом случае свойства КУБ представляются отображением

$$\varphi : U \rightarrow Y.$$

Это отображение не всегда однозначно, поскольку одному значению входа  $u_i$  может в общем случае соответствовать несколько значений выхода  $y_i, y_j, y_k \dots$ . Неоднозначность отображается тем, что, например,  $u_i = u_j$  при  $y_i \neq y_j$ . Одним из способов, с помощью которого можно сделать такое отображение однозначным, является приписывание каждой паре «вход – выход»  $\langle u, y \rangle$  значения некоторого параметра  $x \in X$ , где  $X$  – пространство значений этого параметра. Параметризация пар дает возможность как бы составить каталог возможных сочетаний входных и выходных величин так, чтобы каждому значению  $x$  соответствовало однозначное соотношение  $u$  и  $y$ .

Параметр  $x$ , введенный для какого-либо объекта, фиксирующий строго определенную пару «вход – выход», назовем состоянием этого объекта в данный момент времени  $t$ . Если  $x$  однозначен в любой момент времени, то возможно с его помощью установить однозначное соответствие между входом и выходом. В таком случае состояние системы можно рассматривать как некоторую внутреннюю характеристику, значение которой в настоящий момент времени определяет текущее значение выходной величины и оказывает влияние на ее будущее.

*Определение.* Переменные состояния объекта есть некоторый набор численных составляющих вектора  $x$ , значение которого в момент  $t_0$  необходимо для определения значения этого же вектора в момент  $t > t_0$  с помощью заданной операции при воздействии входа  $u$ , т.е.

$$x(t) = \varphi(t, t_0, x_0, u).$$

Термин «переменные состояния» применяется для того, чтобы различать данное понятие от нестрогого,



часто интуитивного и привычного термина «состояние». ▽.

*Определение.* Совокупность всех возможных значений переменных состояний  $\{x\}$  называется пространством состояний  $X$ ,  $x \in X$ . ▽.

Таким образом, создаваемая математическая модель процесса функционирования КУБ в самой общей постановке состоит из множеств, определенных на пространствах  $T$ ,  $U$ ,  $X$  и обеспечивающих единственность отображения

$$X \otimes U \rightarrow Y.$$

Соответствие между элементами этих множеств определяет не реальный объект, а ядро математической модели КУБ.

Для представления свойств КУБ в математической модели с помощью переменных состояния применяют два векторных уравнения:

$$\dot{x} = f(x, u, t), \quad (1.5)$$

$$y = h(x, u, t). \quad (1.6)$$

Первое уравнение однозначно по начальному состоянию  $x_0$  и входу  $u(t)$  определяет вектор-функцию  $x(t)$ , второе по полученному значению переменных состояния  $x(t)$  и входа  $u(t)$  однозначно определяет выход КУБ  $y(t)$  (рис. 1.9).

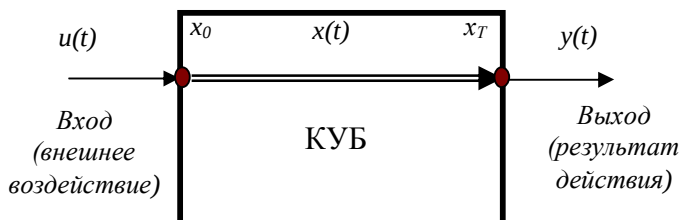


Рис. 1.9

Представление математической модели в виде двух векторных уравнений является следствием параметризации пар «вход-выход». Однозначность определения переменных состояния вытекает из единственности решения дифференциального уравнения (1.5), признаком которого является удовлетворение условиям Липшица правой части на конечном интервале наблюдения  $t \in T, T < \infty$ . Для реальных объектов с ограниченными ресурсами это условие почти всегда выполняется.

Следует отметить, что выбор конкретных множеств  $U, Y, X$  есть не что иное, как замена системы ее свойствами. Именно множества  $U, Y, X$  количественно отражают свойства системы в определенной ориентации “вход – состояние – выход”. Поэтому такие свойства являются относительными. В принципиально другой ориентации один и тот же объект может иметь отличные свойства, а стало быть, и другие входные и выходные переменные и, следовательно, представлять формальную систему.

Любой рациональный набор алгоритмов управления КУБ может быть записан системой дифференциальных уравнений типа

$$R_i(t, w_1, w_2, \dots; w_i; \dot{w}_1, \dots, w_i^{(r_i)}) = 0 \quad (i=1, 2, \dots, n), \quad (1.7)$$

где  $t$  - время,  $w_i, w_i^{(r)}$  - функции параметров процессов управления безопасностью,  $n$  - количество операций, выполняемых комплексом,  $R_i - i^{oe}$  уравнение, принадлежащее классу всевозможных числовых комплексных последовательностей ( $C^\infty$ ).

Систему уравнений (1.7) можно свести к равносильной системе уравнений первого порядка путем замены высших производных вспомогательными неизвестными функциями

$$\frac{dw_i}{dt} = f_i(t, w_1, w_2, w_3, \dots, w_n), \quad (i=1, 2, \dots, n). \quad (1.8)$$

Поскольку произвольный набор процесса управления безопасностью представляет собой систему в общем случае нелинейных уравнений, переменную  $w$  в исходной системе (1.7) следует разделить на входную и выходную составляющие  $u$  и  $y$  (т.е. разделить  $w$  на аргумент и функцию). Эти переменные определяют, какой параметр процесса является управляемым, а какой следует выбрать управляющим. Таким образом,  $w$  следует представить в виде  $Tw = col(y, u)$  для некоторой матрицы перестановки  $T$ . Здесь «входные параметры процесса функционирования КУБ» (управляющие) –  $u$ , «выходные параметры процесса функционирования КУБ» (управляемые) –  $y$ ;  $col$  – операция выписывания друг под другом некоторых строк матрицы. Таким образом, проблема реализации процесса управления безопасностью, состоящего из физических операций, описываемых в общем виде нелинейными системами уравнений, заключается в том, чтобы для заданного отображения последовательностей операций «начало подготовки РКН на ТК с заданным значением показателя безопасности – пуск РКН на СК с назначенным показателем безопасности»

$$y(t) = F(u(\tau); 0 \leq \tau \leq t), t \geq 0, u \in \mathbf{R}^m; y \in \mathbf{R}^p, \quad (1.9)$$

где  $\mathbf{R}^m, \mathbf{R}^p$  – метрические пространства, найти:

1) модель, содержащую множество  $M$  (максимальное многообразие) вариантов управления безопасностью процессов функционирования НТО ТК и СК, в виде множества траекторий переходов в пространстве состояний безопасности, с начальным состоянием  $x_0 \in X$  и конечным состоянием  $x_T \in X$ , где  $X$  – множест-

во состояний безопасности,  $M$  – траектории от  $x_0$  к  $x_T$ , содержащие заданное подмножество преобразований;

2) минимальную реализацию пространств состояний безопасности процессов функционирования НТО ТК и СК ( $M$ ), т.е. найти минимальную траекторию перехода из состояния поставки элементов РКН на ТК ( $x_0$ ) с заданной безопасностью в состояние пуска РКН ( $x_T$ ) с назначенным значением безопасности;

3) систему уравнений, описывающих работу КУБ, реализующую процесс управления безопасностью НТО ТК и СК, т.е. систему типа «исходное состояние безопасности – промежуточные состояния безопасности – безопасность процесса пуска»

$$\begin{aligned} y &= h(x, u), u \in R^m, y \in R^p, \\ \dot{x} &= f(x, u), x(0) = x_0 \in M, \end{aligned} \quad (1.10)$$

где  $x$  – функция состояний, эволюционирующую на  $M$  и имеющую такое же отображение «начальная безопасность – безопасность пуска» (1.9).

КУБ как управляющая система и НТО ТК и СК как объект управления с множеством состояний  $X$  описываются четверкой

$$\sum_{BH} = (T, W, X, B),$$

где  $T \subset R$  – множество моментов времени;

$T$  – некоторый интервал в  $R$ ;

$W$  – алфавит внешних сигналов или пространство, в котором лежат значения переменных и через которое система объектов КУБ взаимодействует с внешней средой;

$X$  – множество состояний;

$B \subset (W * X)^T$  – внутреннее поведение.

Условия реализации такой системы уравнений строятся из предположения, что  $u$ ,  $y$ ,  $w$  – гладкие функции класса  $C^\infty$ . Для алгоритмов управления безопасностью, содержащих процессы, описываемые системами нелинейных уравнений, имеются структурные проблемы их реализации, связанные с условиями интегрируемости исходной модели. Это приводит к тому, что для системы «вход – выход», получаемой из (1.7) и имеющей вид в случае её описания гладкими нелинейными дифференциальными уравнениями высшего порядка

$$D_i(y, \dot{y}, \dots, y^{(k)}) = N_i(u, \dot{u}, \dots, u^{(k)}), i = 1, \dots, p, \quad u \in \mathbf{R}^m, y \in \mathbf{R}^q, \quad (1.11)$$

где  $D(s)$  и  $N(s)$  – полиномиальные матрицы, не всегда существует система «вход – состояния – выход» (1.10), ее реализующая.

Кроме того, не сразу ясно, какие дополнительные ограничения должны быть наложены на (1.11) для того, чтобы корректно назвать  $u$  и  $y$  входными и выходными функциями, т.е. определить, какой параметр процесса следует выбирать управляемым, а какой управляющим.

Основная задача математической реализации процессов функционирования КУБ состоит в том, чтобы модель имеющейся системы физических уравнений

$$R_i \left( w, \dot{w}, \dots, w^{(k)} \right) = 0, \quad i = 1, \dots, n, \quad (1.12)$$

при условии, что каждая функция физических параметров  $w(t)$ , определяемая в интервале  $[0, T]$ ,  $T > 0$  и удовлетворяющая (1.12), может быть продолжена до функции  $W: \mathbf{R} \rightarrow \mathbf{R}^q$ , также удовлетворяющей (1.12), проходила бы параметрические состояния безопасности НТО ТК и СК

$$\left. \begin{aligned} y &= h(x, u) \\ \dot{x} &= f(x, u) \end{aligned} \right\} x \in M, u \in R^m, y \in R^q, \quad (1.13)$$

где  $M$  – гладкое многообразие состояний безопасности,  $f, h$  – гладкое отображение, а управление процессов перехода из состояния в состояние, выполняемое КУБ, соответствовало бы системе

$$\left. \begin{aligned} w &= g(x, v) \\ \dot{x} &= f(x, v) \end{aligned} \right\} x \in M, v \in R^r, w \in R^q, \quad (1.14)$$

где  $M$  – гладкое многообразие,  $f, g$  – гладкие функции своих переменных,  $v$  – управляющие переменные, также являющиеся гладкими функциями времени. При этом необходимо, чтобы:

1) качество управления безопасностью НТО ТК и СК (система 1.14) полностью соответствовало их физическим моделям (исходной системе 1.12);

2) последовательность воздействий КУБ на безопасность НТО ТК и СК, а также назначенные управляемые и управляющие параметры в них, определяемые матрицей перестановок  $T_w = \text{col}(y, u)$  на пространстве  $R^q$ , обеспечивающие переходы состояний безопасности (1.13), полностью обеспечили бы выполнение заданных системой (1.12) начальных и конечных состояний безопасности.

Системе уравнений КУБ, описывающей процессы управления безопасностью НТО ТК и СК, имеющей самую большую общность и представленной в виде нелинейной внешней системы уравнений (1.12), можно сопоставить управляемую систему с пространством состояний, имеющую следующую линейную динамику:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} w \\ \dot{w} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ w^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I_q & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & I_q \\ 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ \dot{w} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ w^{(k)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ I_q \end{bmatrix} \bar{v}, \quad (1.15)$$

где  $v \in \mathbf{R}^q$  – управляющие переменные, и гладкие нелинейные выходные функции

$$z_i = \mathbf{R}_i(w, \dot{w}, \dots, w^{(k)}), \quad i=1, 2, \dots, l. \quad (1.16)$$

В случае с нелинейной системой можно найти максимальное управляемое инвариантное подмногообразие, содержащееся во множестве

$$z_i = \dots = z_l = 0.$$

Задав нелинейную систему с пространством состояний как

$$\dot{x} = g_0(x) + \sum_{j=1}^m u_j g_j(x), \quad x \in M, \quad (1.17)$$

подмногообразие  $N \subset M$  можно назвать управляемым инвариантным подмногообразием для системы (1.17), если существует гладкая обратная связь

$$u_j = \alpha_j(x), \quad j=1, \dots, m,$$

такая что полученное в результате действия этой обратной связи векторное поле

$$\dot{x} = g_0(x) + \sum_{j=1}^m \alpha_j(x) g_j(x), \quad x \in M$$

принадлежит касательному пространству к многообразию  $N$  в каждой точке из  $N$ .

Обобщенное понятие линейного управляемого инвариантного подпространства в нелинейной системе может быть получено с помощью управляемого инвариантного подмногообразия. Однако существование максимального управляемого инвариантного подмногообразия, содержащегося в заданном подмножестве, не гарантируется. Такую гарантию можно получить, если положить на систему некоторые дополнительные ограничения.

Если задать нелинейную систему в виде

$$\dot{x} = g_0(x) + \sum_{j=1}^m u_j g_j(x), \quad x \in M, \\ y = H_i(x), \quad i = 1, \dots, p,$$

а для каждого выходного отображения  $H_i$  определить характеристическое число  $\rho_i$  как наименьшее неотрицательное целое, для которого  $\exists j \in \{1, \dots, m\}$ , такое что

$$L_{g_j} L_{g_0}^{\rho_i} H_i(x) \neq 0$$

для некоторого  $x \in M$ , и предположить, что для  $i = 1, \dots, p$  число  $\rho_i$  существует, а также определить  $p \times m$  - матрицу  $A(x)$ , в которой  $(i, j)$ -й элемент имеет вид

$$A_{ij}(x) = L_{g_j} L_{g_0}^{\rho_i} H_i(x),$$

а  $\text{rank } A(x) = p$  для любой точки  $x \in M$ , тогда можно показать, что максимальное управляемое инвариантное подмногообразие, содержащееся в множестве  $y_1 = \dots = y_p = 0$ , существует и задается формулой

$$N^* = \{x \mid L_{g_0}^k H_i(x) = 0, \quad k = 0, 1, \dots, \rho_i, \quad i = 1, \dots, p\},$$



где все функции  $L_{g_0}^k H_i = 0$ ,  $k = 0, 1, \dots, \rho_i$ ,  $i = 1, \dots, p$  независимы. Кроме того, искомая обратная связь  $u_j = \alpha_j(x)$ ,  $j = 1, \dots, m$  представляется как решение уравнения

$$A(x)\alpha(x) + b(x) = \chi(x), \quad (1.18)$$

где  $b(x)$  – вектор с  $i$ -й компонентой  $L_{g_0}^{\rho_i+1} H_i(x)$ , а  $\chi(x)$  – вектор, составленный из функций, равных нулю на  $N^*$ . Если положить на  $\beta(x)$  как  $m \times (p-m)$  – матрицу ранга  $p-m$ , удовлетворяющую соотношению

$$A(x)\beta(x) = 0,$$

вырожденная обратная связь

$$u_j = \alpha_j(x) - \sum_{k=1}^{p-m} \beta_{jk}(x) v_k,$$

где  $\alpha_j$  – решение уравнения (1.18), дает управляемую систему

$$\dot{x} = g_0(x) + \sum_{j=1}^m \alpha_j g_j(x) + \sum_{k=1}^{p-m} \left( \sum_{j=1}^k \beta_{jk}(x) g_j(x) \right)$$

с  $p-m$  входами  $v_k$ , которые можно ограничить на управляемую систему на  $N^*$ . Аналогично для управляемой системы с пространством состояний (1.15, 1.16) с функциями

$$g_0(w, \dot{w}, \dots, w^{(k)}) = \text{col}(\dot{w}, \dots, w^{(k)}, 0), \quad j = 1, \dots, q \quad (1.19)$$

$$g_j(w, \dot{w}, \dots, w^{(k)}) = \text{col}(0, \dots, 0, e_j),$$

и выходными отображениями  $R_i(w, \dot{w}, \dots, w^{(k)})$ ,  $i = 1, \dots, l$ . Для вычисления  $\rho_i$  заметим, что

$$L_{g_i} L_{g_0}^0 R_i = L_{g_j} R_i = \frac{\partial R_i}{\partial w_j^{(k)}}.$$

Предположим, что для некоторого  $i$  и всех  $j = 1, \dots, q$  выполняется тождество  $\partial R_i / \partial w_j^{(k)} \equiv 0$ . Тогда  $\rho_i \geq 1$ , и чтобы вычислить  $\rho_i$ , необходимо перейти к нахождению

$$L_{g_0} R_i = \sum_{s=1}^q \left( \frac{\partial R_i}{\partial w_s} \dot{w}_s + \frac{\partial R_i}{\partial \dot{w}_s} \ddot{w}_s + \dots + \frac{\partial R_i}{\partial w_s^{(k-1)}} w_s^{(k)} \right). \quad (1.20)$$

Так как  $\partial R_i / \partial w_j^{(k)} \equiv 0$  для  $j = 1, \dots, q$ , то получим, что

$$L_{g_j} L_{g_0} R_i = \frac{\partial R_i}{\partial w_j^{(k-1)}}, \quad j = 1, \dots, q.$$

Предположим, что для этого  $i$  также  $\partial R_i / \partial w_j^{(k-1)} \equiv 0$  при всех  $j = 1, \dots, q$ .

Тогда  $\rho_i \geq 2$ , и из соотношения (1.20) следует, что

$$L_{g_0}^2 R_i = \sum_{s=1}^q \left( \frac{\partial R_i}{\partial w_s} \ddot{w}_s + \frac{\partial R_i}{\partial \dot{w}_s} w_s^{(3)} + \dots + \frac{\partial R_i}{\partial w_s^{(k-2)}} w_s^{(k)} \right) + \\ + \sum_{s=1}^q \left( L_{g_0} \left( \frac{\partial R_i}{\partial w_s} \right) \dot{w}_s + L_{g_0} \left( \frac{\partial R_i}{\partial \dot{w}_s} \right) \ddot{w}_s + \dots + L_{g_0} \left( \frac{\partial R_i}{\partial w_s^{(k-2)}} \right) w_s^{(k-1)} \right).$$

Так как  $\partial R_i / \partial w_j^{(k)} \equiv 0$  для  $j = 1, \dots, q$ , то получим, что

$$L_{g_j} L_{g_0}^2 R_i = \frac{\partial R_i}{\partial w_j^{(k-2)}}, \quad j = 1, \dots, q.$$

Продолжение этих вычислений позволяет утверждать, что для управляемой системы с пространством состояний (1.15, 1.16), для которой векторные поля  $g_0$  и  $g_j$  также определены в виде (1.19), можно определить характеристическое число  $\rho_i$  как наименьшее неотрицательное число, для которого  $\exists j \in \{1, \dots, q\}$ , такое что

$$\frac{\partial R_i}{\partial w_j^{(k-\rho_i)}}(x) \neq 0 \text{ для некоторого } x = (w, \dot{w}, \dots, w^{(k)}), \quad (1.21)$$

и  $(i, j)$  - й элемент матрицы  $A(x)$  имеет вид

$$A_{ij}(x) = \frac{\partial R_i}{\partial w_j^{(k-\rho_i)}}(x), \quad x = (w, \dot{w}, \dots, w^{(k)}). \quad (1.22)$$

Из этого следует, что  $\rho_i$  существует тогда и только тогда, когда функция  $R_i$  не является константой, и если  $\rho_i$  существует, то  $\rho_i \leq k$ . Если уравнение  $R_i(w, \dot{w}, \dots, w^{(k)}) = 0$ , то предположение  $R_i = 0$  можно опустить. Если же  $R_i$  – ненулевая константа, то  $R_i(w, \dot{w}, \dots, w^{(k)})$  не имеет решения.

Далее можно предположить, что ранг матрицы

$$\left( \frac{\partial R_i}{\partial w_j^{(k-\rho_i)}}(w, \dot{w}, \dots, w^{(k)}) \right), \quad i = 1, \dots, l, \quad j = 1, \dots, q$$

равен  $l$  для любых  $(w, \dot{w}, \dots, w^{(k)})$ . Тогда можно утверждать, что максимальное управляемое инвариантное подмногообразие управляемой системы с пространством состояний (1.15, 1.16), содержащееся во множестве, определенном выходным отображением

$$z_i = R_i(w, \dot{w}, \dots, w^{(k)}) = 0, \quad (i=1, 2, \dots, l),$$

существует и задается формулой

$$N^* = \{(w, \dot{w}, \dots, w^{(k)}) \in R^{(k+1)q} \mid L_{g_0}^r R_i(w, \dot{w}, \dots, w^{(k)}) = 0, \\ r = 0, 1, \dots, \rho_i, \quad i = 1, \dots, l\},$$

где  $\rho_i$  определяется по предложенному алгоритму (1.22),

а уравнение  $L_{g_0}^r R_l$  имеет вид



пространством состояний (1.23, 1.24) является управляемой реализацией внешней системы

$$R_i(w, \dot{w}, \dots, w^{(k)}) = 0, i = 1, \dots, l, \quad w \in \mathbf{R}^q.$$

В рассматриваемом нелинейном случае вычисление минимального условно инвариантного подпространства, содержащего направления, соответствующие управляемым переменным, формулируется через задание нелинейной системы

$$\begin{aligned} \dot{x} &= g_0(x) + \sum_{j=1}^m u_j g_j(x), \quad x \in M, \\ y_i &= H_i(x), \quad i = 1, \dots, p. \end{aligned} \quad (1.25)$$

Инволютивное распределение  $S$  на многообразии  $M$  называется условно инвариантным, если

$$\left[ g_j, S \cap \left( \bigcap_{i=1}^p \ker dH_i \right) \right] \subset S, \quad j = 0, 1, \dots, m. \quad (1.26)$$

При этом важно, что условно инвариантны распределения, содержащие входные векторные поля  $g_j, j = 1, \dots, m$ , т.е.

$$\left[ g_0, S \cap \left( \bigcap_{i=1}^p \ker dH_i \right) \right] \subset S, \quad g_j \in S, \quad j = 1, \dots, m. \quad (1.27)$$

Если  $S$  – регулярное распределение (т.е. оно инволютивно и имеет постоянную размерность), то эквивалентное определение можно дать при помощи кораспределения. Задав  $P$  как регулярное (инволютивное постоянной размерности) кораспределение, можно ввести аннулирующее его регулярное распределение как  $\ker P(x) = \{X(x) \in T_x M \mid \alpha(X)(x) = 0 \text{ для любой формы } 1\text{- формы } \alpha \text{ из } P\}$ .

Теперь пусть  $P$  – такое регулярное кораспределение, что  $\ker P = S$ . Тогда условие (1.26) эквивалентно включению

$$L_{g_i} P \subset P + \text{span} \{ d H_1, \dots, d H_p \}, j = 0, 1, \dots, m,$$

следовательно, (1.27) эквивалентно включениям

$$\begin{aligned} L_g P \subset P + \text{span} \{ d H_1, \dots, d H_p \}, \\ g_i \in \ker P, j = 1, \dots, m. \end{aligned} \quad (1.28)$$

Тогда для нелинейной системы (1.25) и  $P$  – регулярного кораспределения, удовлетворяющих соотношениям (1.28), можно провести глобальную факторизацию по регулярному распределению  $\ker P$ , т.е. утверждать, что существует многообразие  $\bar{M}$  и сюръективная субмерсия  $\pi: M \rightarrow \bar{M}$ , такая что  $\ker \pi^* = \ker P$ . А также многообразие  $\bar{M}$  односвязно. В этом случае система (1.25) проектируется субмерсией  $\pi$  в нелинейную систему на  $\bar{M}$ , управляемую выходами

$$y = (y_1, \dots, y_p):$$

$$\dot{\bar{x}} = \bar{g}_0(\bar{x}, y), \quad \bar{x} \in \bar{M},$$

т.е.

$$\pi^* g_0(\pi(x)) = \bar{g}_0(\pi(x), H_1(x), \dots, H_p(x)),$$

$$\pi^* g_j = 0, \quad j = 1, \dots, m.$$

Отсюда видно, что динамика части состояния, соответствующей условно инвариантному кораспределению  $P$ , для которого  $g_j \in \ker P$ , управляется только выходами  $H_1(x), \dots, H_p(x)$ .

Основываясь на (1.25), можно предположить, что  $S_1$  и  $S_2$  – инволютивные условию инвариантные распределения, т.е. они удовлетворяют (1.26). Из чего вытекает, что распределения  $S_1 \cap S_2$  тоже удовлетворяют

включению (1.26) и поэтому условию инвариантны. Следовательно, применение леммы Цорна позволяет заключить, что всегда существует минимальное условно инвариантное распределение, обозначаемое через  $S^*$ , содержащее данное распределение, и его можно вычислить.

Построить минимальную реализацию типа «вход–выход» можно через расширение системы (1.26)

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x^2, u) \\ \dot{u} &= v \end{aligned} \Big|_{\mathcal{P}} \quad u, v \in R^{q-s}, \quad (1.29)$$

где  $v$  - новые входные функции (т.е. путем добавления к исходной системе  $q-s$  интегралов, переменные  $u$  становятся частью вектора состояний). Взяв в качестве выходного отображения переводящее расширенное состояние  $(x^2, u)$  в полный вектор внешних переменных

$$w = \text{col} (h(x^2, u), u) := C(x^2, u) \quad (1.30)$$

и введя векторное поле на многообразии  $M^2 \times R^{q-s}$ :

$$A(x^2, u) = f(x^2, u) \frac{\partial}{\partial x},$$

$$B_j(x^2, u) = \frac{\partial}{\partial u_j}, \quad j=1, \dots, q-s,$$

а также определив распределение  $B$  и кораспределение  $B^\perp$  как

$$B(x^2, u) = \text{span} \left\{ \frac{\partial}{\partial u_1}, \dots, \frac{\partial}{\partial u_{q-s}} \right\} \Big|_{\mathcal{P}} \quad \ker B^\perp = B,$$

можно получить построение управляемого инвариантного кораспределения для системы (1.29), (1.30), определив возрастающую последовательность кораспределений

$$\Omega_0 = dC,$$

$$\Omega_k = \Omega_{k-1} + L_A(B^\perp \cap \Omega_{k-1}) + \sum_{j=1}^{q-s} L_{B_j}(B^\perp \cap \Omega_{k-1}), k=1,2,\dots, \quad (1.31)$$

где  $C = (C_1, \dots, C_q)$  и  $dC$  есть кораспределение вида  $\text{span} \{ dC_i, i = 1, \dots, q \}$ . Предположив, что размерности  $\Omega_k$  и  $B^\perp \cap \Omega_k$ , где  $k = 0, 1, 2, \dots$ , постоянны, из конечности многообразия  $M^2 \times R^{q-s}$  следует, что алгоритм (1.31) оканчивается за конечное число шагов, т.е. существует такое число  $k < \dim(M^2 \times R^{q-s})$ , что

$$\Omega_k = \Omega_{k-1} \text{ и } \Omega_{k+l} = \Omega_k, \quad l = 2, 3, \dots$$

Положим  $\Omega^* = \Omega_k$ . Таким образом, следует, что  $\Omega^*$  является минимальным локально управляемым инвариантным кораспределением, содержащим кораспределение  $dC$ . Кораспределение  $\ker \Omega^*$  на многообразии  $M^2 \times R^{q-s}$  проектируется в некоторое распределение  $\Delta^*$  на многообразии  $M^2$ . А поскольку кораспределение  $\Omega$  регулярно, а  $B^\perp \cap \Omega^*$  имеет постоянную размерность, то  $\Delta^*$  является регулярным распределением. Следовательно, многообразие  $M^2$  можно факторизовать по  $\Delta^*$  для того, чтобы получить в качестве меньшего пространства состояний многообразии  $M^3$ .

Рассмотрим внешнюю систему

$$R_i \left( y, u, \dot{y}, \dot{u} \right) := \dot{y}_i - a_i(y, u, \dot{u}) = 0, \quad (1.32)$$

$$i = 1, \dots, m,$$

где  $a_i$  – некоторые гладкие функции. Положим  $Y=U=R^m$  и  $W=Y \times U$  с координатами  $w = (y, u)$ . Положим  $a(y, u, \dot{u}) = \text{col}(a_1(y, u, \dot{u}), \dots, a_m(y, u, \dot{u}))$ .

Для внешней системы управляемая система с пространством состояний имеет вид



$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} y \\ u \\ \dot{y} \\ \dot{u} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & I_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_m \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y \\ u \\ \dot{y} \\ \dot{u} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ I_m & 0 \\ 0 & I_m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \overline{v_1} \\ \overline{v_2} \end{pmatrix} \quad (1.33)$$

$$z = \dot{y} - a(y, u, \dot{u}).$$

Все характеристические числа  $\rho_i$ ,  $i = 1, \dots, m$  равны нулю и матрица  $A$  задается равенством

$$A(y, u, \dot{y}, \dot{u}) = \begin{pmatrix} \bullet \\ I_m \bullet - \frac{\partial a}{\partial \dot{u}}(y, u, \dot{u}) \\ \bullet \\ \bullet \end{pmatrix}.$$

Очевидно, что  $\text{rank } A = m$ , и максимально управляемое инвариантное подмногообразие, содержащееся в множестве  $z = 0$ , определяется соотношением

$$N^* = \left\{ (y, u, \dot{y}, \dot{u}) \mid \dot{y} - a(y, u, \dot{u}) = 0 \right\},$$

и управляемая система с пространством состояний на многообразии

$$M^1 := N^*$$

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} y \\ u \\ \dot{u} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a(y, u, \dot{u}) \\ \dot{u} \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} o \\ o \\ v \end{pmatrix}$$

$$w = (y, u)$$

(с  $v = \overline{v_2}$ ) является управляемой реализацией с пространством состояний внешней системы (1.32).

Очевидно, что распределение

$$S_I = \text{span}\{\partial/\partial \dot{u}_1, \dots, \partial/\partial \dot{u}_m\}$$

является инволютивным и имеет постоянную размерность. Распределение  $S_2$  представляет собой линейную оболочку распределения  $S_1$  и скобок Ли

$$\left[ \sum_{i=1}^m (a_i(y, u, \dot{u}) \frac{\partial}{\partial y_i} + \dot{u}_i \frac{\partial}{\partial u_i}), \frac{\partial}{\partial \dot{u}_j} \right] = - \sum_{i=1}^m \frac{\partial a_i}{\partial \dot{u}_j}(y, u, \dot{u}) \frac{\partial}{\partial y_i} - \frac{\partial}{\partial u_j}. \quad (1.34)$$

Ясно, что  $S_2$  тоже имеет постоянную размерность. Анализ скобок Ли следующих векторных полей из  $S_2$  показывает

$$\left[ - \sum_{i=1}^m \frac{\partial a_i}{\partial \dot{u}_j}(y, u, \dot{u}) \frac{\partial}{\partial y_i} - \frac{\partial}{\partial u_j}, \frac{\partial}{\partial \dot{u}_l} \right] = \sum_{i=1}^m \frac{\partial^2 a_i}{\partial \dot{u}_l \partial \dot{u}_j}(y, u, \dot{u}) \frac{\partial}{\partial y_i}. \quad (1.35)$$

Если  $\partial^2 a_i / (\partial \dot{u}_l \partial \dot{u}_j) \neq 0$ , то поле (1.35) не содержится в  $S_2$ . Следовательно,  $S_2$  будет инволютивным только в том случае, когда все функции  $a_i(y, u, \dot{u})$  аффинны по  $\dot{u}$ , т.е. выражаются в виде

$$a(y, u, \dot{u}) = b(y, u) + \sum_{j=1}^m c_j(y, u) \dot{u}_j$$

для некоторых гладких отображений

$$b, c_1, \dots, c_m : \mathbf{R}^m \times \mathbf{R}^m \rightarrow \mathbf{R}^m.$$

Тогда в силу (1.34)

$$S_2 = \text{span} \left\{ \frac{\partial}{\partial \dot{u}_1}, \dots, \frac{\partial}{\partial \dot{u}_m}, \frac{\partial u_1}{\partial} + \sum_{i=1}^m c_1^i(y, u) \frac{\partial}{\partial y_i}, \dots, \frac{\partial}{\partial u_m} + \sum_{i=1}^m c_m^i(y, u) \frac{\partial}{\partial y_i} \right\},$$

причем  $c_j(y, u) = \text{col} (c_j^1(y, u), \dots, c_j^m(y, u))$ ,  $j = 1, \dots, m$ .

Анализируя скобку Ли

$$\left[ \frac{\partial}{\partial u_j} + \sum_{i=1}^m c_j^i(y, u) \frac{\partial}{\partial y_i}, \frac{\partial}{\partial u_l} + \sum_{i=1}^m c_l^i(y, u) \frac{\partial}{\partial y_i} \right] =$$

$$= \sum_{i=1}^m \left( \frac{\partial c_l^i}{\partial u_j} - \frac{\partial c_j^i}{\partial u_l} + \sum_{r=1}^m \left( \frac{\partial c_l^i}{\partial y_r} c_j^r - \frac{\partial c_j^i}{\partial y_r} c_l^r \right) \right) \frac{\partial}{\partial y_i}, \quad (1.36)$$

можно заметить, что распределение  $S_2$  инволютивно тогда и только тогда, когда все выражения в (1.36) равны нулю. В этом случае  $S_2 = S^*$ .

При этом система типа «вход – состояние – выход» на многообразии  $M^2$  (где  $\pi : M^1 \rightarrow M^2$  – такая сюръективная субмерсия, что  $\ker \pi_* = S^*$ ) имеет такое же внешнее поведение, что и управляемая система с пространством состояний. Следовательно, реализация типа «вход–выход» системы (1.32) существует, а условие обращения в нуль выражений (1.36) есть условие минимальной реализации типа «вход–выход».

Таким образом, внешне заданной системе нелинейных уравнений

$$R_i(w, \dot{w}, \dots, w^{(k)}) = 0; i=1, \dots, l; w \in R^q$$

допустимо преобразование  $\bar{R}(s) = R(s) U(s)$ , где  $U(s)$  – унимодулярная  $l \times l$  матрица, такая что

$$U(s)R(s) = \begin{pmatrix} \tilde{R}(s) \\ 0 \end{pmatrix},$$

где  $\tilde{R}(s)$  есть собственная по строкам  $l' \times q$ -матрица, причем  $l' \leq l$ , а 0 обозначает нулевую матрицу размера  $(l-l') \times q$ . В результате чего внешняя система преобразуется к виду

$$\tilde{R}_i(w, \dot{w}, \dots, w^{(k)}) = 0; i=1, \dots, l \quad (1.37)$$

вместе с некоторыми уравнениями

$$\tilde{R}_i = 0; i=l'+1, \dots, l, \quad (1.38)$$

где функции  $\tilde{R}_i$  константы. Если все эти константы равны нулю, то уравнения (1.38) несовместимы и решения не существует (не выполняется условие интегрируемости), в противном случае система (1.37) преобразуется в систему, аналогичную линейной,

$$\tilde{R} \left( \frac{d}{dt} \right) w(t) = 0,$$

с собственной по строкам  $l' \times q$  матрицей  $\tilde{R}_i(s)$  ( $l < l'$ ).

Полученный таким образом результат показывает, что минимальной управляемой реализации для КУБ возможно достичь при условии отсутствия в нем нелинейных уравнений. Иными словами, управление безопасностью процессов функционирования НТО ТК и СК желательно строить на процессах, описываемых линейными уравнениями.

Имея такие результаты, обратимся к трем основным компонентам КУБ: техническим, информационным и кадровым аспектам его функционирования.

Здесь возникает вопрос, возможно ли построить технические средства КУБ на процессах, описываемых линейными уравнениями? В работе [62] показано, что такого результата можно достичь и этот результат соответствует созданию автоматических технических устройств.

Информационная составляющая КУБ имеет основной задачей формирование диагностической модели

безопасности НТО ТК и СК. На основе этой модели должны формироваться признаки опасности, обеспечивающие «полную наблюдаемость» факторов безопасности.

В работе [63] показано, что с введением понятия «системное пространство состояний» объекта управления в виде вектора  $Z = (U, \Omega, T)$ , где  $U$  – вектор положения объекта в системном пространстве,  $\Omega$  – вектор внутренних свойств объекта,  $T$  – тактовое время, можно кодировать состояние объекта и распознавать его. При условии независимости координат множество состояний объекта может быть описано как декартово произведение множеств состояний по всем координатам. При использовании такого кодирования объект управления может быть представлен траекторией изображающей точки  $z$  в пространстве  $Z$ . В дальнейшем, используя комбинаторные приемы и положения теории графов, производится моделирование переходов элемента из одного состояния в другое с учетом множества функциональных состояний и строится дискретная модель в виде дерева функционирования. Такая модель показывает, что информационная составляющая КУБ не содержит нестационарных элементов, и поэтому в части информационной компоненты КУБ может быть достигнута его минимальная реализация, соответствующая эффективности управления безопасностью НТО ТК и СК.

Наиболее сложным для описания КУБ является наличие человеческого фактора. При детальном рассмотрении этой части модели КУБ следует учесть положения двух теорем Геделя. Эти теоремы математической логики о неполноте формальных систем определённого рода имеют следующую формулировку:

Первая из них: во всякой достаточно богатой непротиворечивой теории первого порядка (в частности, во всякой непротиворечивой теории, включающей формальную арифметику) существует такая замкнутая формула  $F$ , что ни  $F$ , ни ее отрицание  $\neg F$  не являются выводимыми в этой теории.

Иначе говоря, в любой достаточно сложной непротиворечивой теории существует утверждение, которое средствами самой теории невозможно ни доказать, ни опровергнуть. Например, такое утверждение можно добавить к системе аксиом, оставив её непротиворечивой.

Вторая теорема имеет следующую формулировку: во всякой достаточно богатой непротиворечивой теории первого порядка (в частности, во всякой непротиворечивой теории, включающей формальную арифметику) формула  $F$ , утверждающая непротиворечивость этой теории, не является выводимой в ней.

Иными словами, непротиворечивость достаточно богатой теории не может быть доказана средствами этой теории. Однако вполне может оказаться, что непротиворечивость одной конкретной теории может быть установлена средствами другой, более мощной формальной теории. Но тогда встаёт вопрос о непротиворечивости этой второй теории и т. д.

Используя положения этих теорем при описании облика КУБ, можно утверждать, что средствами нелинейных и тем более линейных соотношений человека изучить и описать нельзя. Из чего следует, что КУБ, построенный на основе управления безопасностью процессов функционирования, во главе которого стоит оператор, не даст желаемого результата. В правоте этого положения нас убеждает существующая практика обеспечения безопасности НТО ТК и СК. Существующая система управления безопасностью, в частности в Кос-

мических войсках [64], содержит следующие положения:

- Управление безопасностью эксплуатации вооружения регламентируется правовыми, нормативными, руководящими и методическими документами органов военного управления, должностных лиц по осуществлению правовых, социально-экономических, организационно-технических, санитарно-гигиенических, лечебно-профилактических и иных мероприятий, направленных на обеспечение безаварийной эксплуатации вооружения, безопасности, работоспособности и сохранения здоровья личного состава.

- Нормативной и методологической основой управления безопасной эксплуатацией вооружения являются законодательные акты, постановления и распоряжения Правительства Российской Федерации по вопросам охраны труда, нормативная и нормативно-техническая документация, приказы и директивы Министра обороны Российской Федерации, его заместителей, командующего Космическими войсками, его заместителей.

Поскольку полностью отказаться от участия человека в процессе управления безопасностью невозможно, то при формировании облика КУБ с учетом полученных математических предпочтений следует максимально ограничить его вмешательство в работу КУБ.

Практический вывод из этих рассуждений сводится к необходимости создания автоматизированной системы управления безопасностью. Такая система должна быть распространена на все аспекты деятельности КУБ:

- проектирование агрегатов и систем НТО ТК и СК;

- создание РКД и ЭД для НТО ТК и СК;
- изменение РКД и ЭД для НТО ТК и СК;
- сбор информации о техническом состоянии НТО ТК и СК;
- оценивание уровня опасности процессов функционирования НТО ТК и СК;
- выработка управляющего воздействия для управления безопасностью НТО ТК и СК;
- реализация управляющего воздействия на процессы функционирования НТО ТК и СК в интересах поддержания их безопасного состояния;
- контроль за действенностью принятых решений и действий в интересах обеспечения безопасности процессов функционирования НТО ТК и СК.

Результаты, представленные в настоящем разделе, позволяют сделать следующие выводы:

1. Проблема обеспечения безопасности функционирования НТО ТК и СК, решаемая на основе введения в КРК новой компоненты – комплекса управления безопасностью (КУБ), требует разработки новых методологических положений. КУБ является сложной организационно-технической структурой, формирование облика которой возможно с позиций системного подхода.

2. Применение системного подхода к формированию облика КУБ требует разработки новых концептуальных положений, которые должны учитывать:



- отсутствие требований, предъявляемых к вновь создаваемому комплексу;
- необходимость формирования концепций построения и функционирования КУБ, а также принципов для синтеза основных компонент комплекса;
- систему оценивания назначенных свойств комплекса как на этапе проектирования, так и на этапе его эксплуатации.

3. Сложность и неопределенность для КУБ, наблюдаемая при его создании и поведении, вызванная неопределенностью его структурной, операционной и параметрической реализации, может быть компенсирована построением математической модели его реализации на уровне теории систем. Результаты анализа реализуемости назначенного облика КУБ показывают, что:

- комплекс управления безопасностью процессов функционирования НТО ТК и СК должен иметь автоматизированные компоненты как в технической, так и в информационной составляющей;
- желаемых свойств КУБ можно достичь при условии максимального ограничения человеческого фактора в вопросах оперативного вмешательства в процессы управления безопасностью НТО ТК и СК. Из чего следует необходимость разработки и создания автоматизированных алгоритмических и программных средств распознавания, оценивания опасных ситуаций в процессах управления безопасностью функционирования НТО ТК и СК, а также принятия решений по достижению безопасности НТО ТК и СК. При этом такие средства

должны касаться не только процессов эксплуатации, но и затрагивать аспекты проектирования, включая вопросы планирования и проведения НИР и НИОКР.

4. Решение комплекса проблем по формированию облика КУБ должно включать методы оценивания безопасности процессов функционирования НТО ТК и СК на этапах проектирования и эксплуатации, а также методы информационно-технического обеспечения процессов функционирования НТО ТК и СК.

5. Особое место при формировании КУБ занимают вопросы учета человеческого фактора, влияющего на эффективность его функционирования, которые могут быть решены при разработке системы организации процессов управления безопасностью НТО ТК и СК.

## **II. СИСТЕМА ОЦЕНИВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОЦЕССОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ И СТАРТОВЫХ КОМПЛЕКСОВ НА ЭТАПАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИИ**

### **2.1 Источники опасности процессов функционирования техно- логического оборудования технических и стартовых комплек- сов**

2.1.1 Проблемы обеспечения безопасности на этапе проектирования.

При создании безопасно функционирующих СК и ТК еще не в полной мере проявляется системность. Сегодня необходимо, чтобы параллельно с проектированием целевых агрегатов и систем НТО ТК и СК выполнялось формирование облика технологических средств обеспечения безопасной эксплуатации. Свойства НТО ТК и СК, закладываемые в проекте, должны формировать потребность в создании технологических средств обеспечения безопасной эксплуатации и определять её характеристики.

Исходные данные на проектирование НТО ТК и СК содержатся в технических заданиях, которые разрабатываются сегодня в соответствии с нормативными документами. Эти документы определяют номенклатуру требований, включая безопасность, и дают ориентировочные значения для базовых показателей. К сожалению, устоявшихся показателей безопасности до сих пор не существует (рис. 2.1). Конкретизация требований для НТО ТК и СК выполняется в ТТЗ на каждый ракетно-космический комплекс. В техническом задании устанавливаются требования к разрабатываемому комплексу, основные технические и эксплуатационные характе-

ристики, которые должны быть получены при разработке комплекса, а затем подтверждены при его испытаниях.

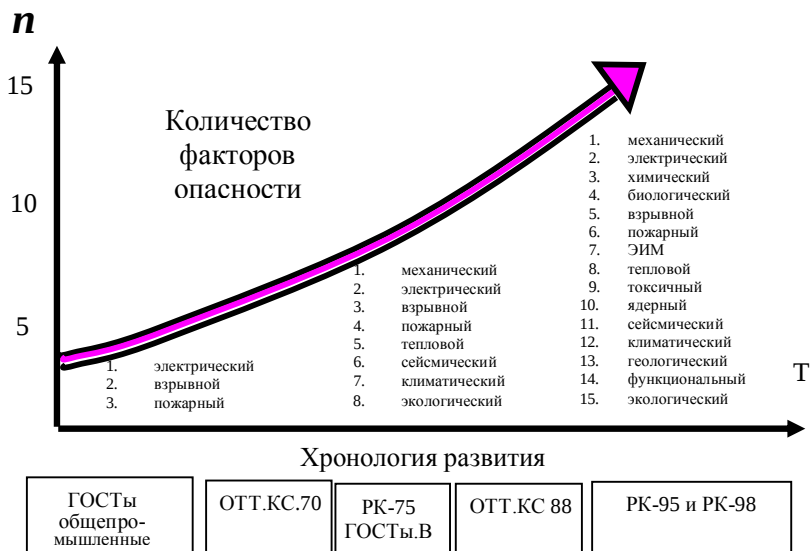


Рис. 2.1

Формально техническое задание представляет собой набор требований, имеющих конкретизированные значения показателей.

Из традиционной процедуры назначения показателей неясно:

5. Какие значения таких показателей следует назначать? Как высчитать значения вероятности их возникновения для еще не существующего (проектируемого) комплекса? А если они назначены правильно, то как и за счет чего их достичь?

6. Каким образом заказчик НТО ТК и СК может

проверить соответствие назначенных и реально существующих значений показателей безопасности?

7. Каким образом учитывается уровень ущерба, характер повреждений и степень риска, сопутствующие появлению и развитию аварийной ситуации?

8. Какой ценой достигается требуемый уровень безопасности, т.е. при расходовании каких ресурсов достигаются все перечисленные показатели, и является ли такой расход ресурсов (в том числе и финансовых) допустимым и оправданным?

9. Каким образом диагностировать и предсказывать возникновение опасных ситуаций на комплексе?

10. Каким образом в показателе безопасности связаны надежность, защищенность и восстанавливаемость оборудования?

11. Каким образом выполнить рекомендации нормативных документов по обеспечению безопасности путем проработок схемно-конструктивных решений оборудования?

2.1.2. Проблема обеспечения безопасности НТО ТК и СК на этапе эксплуатации существовала всегда, но на современном этапе она существенно обострилась. В настоящее время многие наземные комплексы КРК эксплуатируются на основании решений о продлении назначенных показателей ресурса и срока службы. Такие решения принимаются с учетом текущего технического состояния НТО ТК и СК, но при этом, как правило, недостаточно внимания уделяется вопросам, связанным с обеспечением безопасности их эксплуатации. Главной причиной этого является отсутствие нормативной базы и методического аппарата анализа безопасности эксплуатации и формирования требований по ее обеспечению.

Обеспечение высокого уровня надежности и безопасности эксплуатации НТО ТК и СК осложняется влиянием ряда факторов. Одним из них является усложнение системы эксплуатации НТО ТК и СК как следствие развития орбитальных космических средств и средств их выведения. Проводимые на комплексах доработки оборудования существенно усложнили структурно-функциональный облик НТО ТК и СК, усложнив тем самым и систему его эксплуатации.

Еще одним фактором, затрудняющим решение проблемы обеспечения безопасности эксплуатации НТО ТК и СК, является неопределенность технического состояния элементов его оборудования. Эта неопределенность мешает обоснованному и своевременному принятию решений, направленных на обеспечение безопасности эксплуатации НТО ТК и СК в условиях недостаточного финансирования.

Несомненное влияние на качество эксплуатации НТО ТК и СК оказало разрушение культуры космической деятельности, складывавшейся десятилетиями и основанной на строгой регламентации взаимоотношений между участниками космической кооперации (в результате создались предпосылки для снижения качества проектных разработок, качества производства изделий космической техники и, как следствие, для снижения безопасности космической деятельности).

В связи с демократизацией общественной жизни нельзя не отметить актуализацию проблем защиты собственности юридических и физических лиц, а также окружающей природной среды.

Еще одним важным фактором, снижающим безопасность эксплуатации НТО ТК и СК, является включение (в связи с новыми экономическими условиями космической деятельности) в кооперацию новых организа-

ций и предприятий, ранее не занимавшихся космической деятельностью и не знакомых с требованиями и технологией работ, выполняемых в ходе этой деятельности.

Приведенные выше факторы являются объективными, поэтому должны рассматриваться в качестве ограничений, при которых решается проблема обеспечения безопасности эксплуатации НТО ТК и СК. Но существует еще и субъективный фактор, в качестве которого следует рассматривать повышение требований руководящих документов к безопасности и надежности функционирования НТО ТК и СК (в том числе и в части экологической безопасности). Этот фактор, в отличие от объективных, должен в ходе решения проблемы формирования КУБ глубоко анализироваться и при необходимости обоснованно уточняться (путем формирования предложений в адрес лица, принимающего решения, или предложений по изменению нормативно-технических документов).

Все перечисленные выше особенности эксплуатации НТО ТК и СК носят организационный характер. Но наряду с ними имеют место особенности технического характера.

Во-первых, это обусловлено старением и износом элементов НТО ТК и СК, что ухудшает их характеристики и осложняет обеспечение требований по надежности и безопасности. Во-вторых, это недостаточная техническая готовность средств обеспечения безопасности эксплуатации НТО ТК и СК. Необходимо отметить, что эта особенность характерна только для этапа продленного срока службы и только в условиях недостаточного финансирования. И наконец, в-третьих, снижение качества действий обслуживающего персонала НТО ТК и СК.

Рассмотренные особенности эксплуатации НТО ТК и СК обостряют проблему обеспечения ее безопасности. Острота и важность такой проблемы усугубляются тем, что на сегодняшний день она на научном уровне недостаточно разработана, а на инженерном уровне решается интуитивно и не всегда успешно. При этом практически отсутствует научно-методический аппарат нормирования требований к безопасности эксплуатации НТО ТК и СК, ее анализа, а также формирования требований по ее обеспечению.

## **2.2. Комплекс показателей, участвующих в оценивании безопасности**

Основной задачей при формировании облика КУБ является разработка положений, обеспечивающих достижимость желаемого свойства этого комплекса – возможности управлять безопасностью. Поскольку это свойство сложное, то представляется важным определить, при каких условиях и через обладание какими более простыми свойствами можно его достичь.

Решение этой задачи можно получить, используя подходы Калмана в теории систем [65]. В этой работе рассматривались линейные системы, в которых пространства входных сигналов ( $I$ ), выходных сигналов ( $Y$ ) и состояний ( $Q$ ) являются конечномерными векторными пространствами над полем  $K$ . Под полем  $K$  следует понимать поле действительных чисел  $\mathbf{R}$ .

Сутью рассматриваемого здесь математического образа КУБ является пара  $(Q, F)$ , где  $Q$  – пространство состояний комплекса, а  $F: Q \rightarrow Q$  – линейное отображение, которое представляет собой изменение состояний, индуцированное поступлением на вход одиночного нулевого сигнала. Поскольку рассматриваемый комплекс



(КУБ) в соответствии с дискретностью работы КРК или НТО ТК и СК также является дискретным, то из соотношений  $q(t) = q$  и  $i(t) = 0$  вытекает  $q(t+1) = Fq$ . Тогда пару  $(Q, F)$  можно назвать системной динамикой КУБ. При этом выходное отображение  $G: I \rightarrow Q$  и входные отображения  $H: Q \rightarrow Y$  можно задать в самом общем виде. Здесь  $G$  и  $H$  являются линейными отображениями векторных пространств, что позволяет получить

$$\begin{aligned} q(t+1) &= F q(t) + G i(t), \\ y(t) &= H q(t). \end{aligned}$$

Формируя будущие свойства КУБ, важно знать возможное поведение комплекса при условии, что его начальное состояние равно 0. Поступающая на его вход последовательность информационных сигналов  $i_n, i_{n-1}, \dots, i_0$ , в которой каждое  $i_j \in I$  поступает в момент времени  $t = -j$ , можно представить как бесконечную последовательность  $(\dots, 0, \dots, 0, i_n, i_{n-1}, \dots, i_0)$  и ввести множество всех таких последовательностей  $I^* = \{(\dots, i_j, \dots, i_1, i_0) \mid \text{каждое } i_j \text{ принадлежит } I, \text{ но только конечное число } i_j \text{ отлично от нуля}\}$ . Это множество обозначим как  $\Omega$ . После поступления этого входного воздействия в комплексе будет наблюдаться выходной сигнал  $y_k$  в каждый момент времени  $t = k + 1 > 1$ . Результирующая последовательность является элементом множества

$Y^* = \{(y_0, y_1, \dots, y_k, \dots) \mid \text{каждое } y_k \text{ принадлежит } Y\}$ , которое можно обозначить  $I$ . Следует отметить, что  $Y^*$  не удовлетворяет условию «конечности носителя», наложенному на входные последовательности.

Если задано, что комплекс находится в начальном состоянии 0 и на вход до момента  $t = 0$  поступает последовательность  $I = (\dots, i_j, \dots, i_1, i_0) \in I^*$ , то состояние

комплекса в момент времени  $t = 1$ , очевидно, будет определяться равенством

$$r(i) = \sum_{i \geq 0} F^i G i_j,$$

в котором сумма конечна, так как последовательность  $i$  имеет конечный носитель. Таким образом, состояние  $r(i)$  является **достижимым** из состояния 0 в результате поступления входной последовательности  $i$ , поэтому выражение

$$r: I^* \rightarrow Q, \quad i \mapsto \sum_{j \geq 0} F^j G i_j$$

является достижимым отображением пары  $(F, Q)$ . Можно считать, что пара  $(F, Q)$  достижима, если каждое состояние достижимо из нулевого состояния, т.е. если  $r$  отображает  $I^*$  на  $Q$ :  $Q = r(I^*)$ . Следует отметить, что в момент времени  $k$  выход комплекса, начинающего функционировать из состояния  $q$  при  $t = 1$  и получившего выходные сигналы  $i(1), i(2), \dots, i(k-1)$  в указанные моменты времени, в точности равен

$$HF^{k-1}q + \sum_{j=1}^{k-1} HF^{k-j-1}Gi(j)$$

и что только первый член этой суммы зависит от  $q$ . Следовательно, чтобы получить информацию о состоянии  $q$  комплекса в момент времени  $t = 1$ , необходимо только наблюдать его состояние в каждый момент времени  $t \geq 1$ . Тогда, очевидно, в момент  $k + 1$  выход будет таков:

$$y_k = HF^k q,$$

и поэтому отображение

$$\sigma: Q \rightarrow Y_*, q \mapsto (Hq, HFq, \dots, HF^k q, \dots)$$

следует называть наблюдаемым отображением пары  $(F, H)$ . Следует считать, что пара  $(F, H)$  наблюдаема в том случае, когда наблюдения могут различать любую пару состояний, т.е. в том случае, когда  $\sigma$  - взаимно однозначное отображение:

$$q \neq q' \Rightarrow \sigma(q) \neq \sigma(q').$$

Следует отметить, что если превратить  $I^*$  и  $Y_*$  в векторные пространства, введя операции покомпонентно, так чтобы выполнялось равенство

$$a(y_1, \dots, y_k, \dots) + a'(y'_1, \dots, y'_k, \dots) = (ay_1 + a'y'_1, \dots, ay_k + a'y'_k, \dots),$$

то оба отображения  $g: I^* \rightarrow Q$  и  $Q \rightarrow Y_*$  будут линейными отображениями, так же как и их композиция

$$f^\Delta = \sigma \circ g: I^* \rightarrow Y_*,$$

которая переводит некоторую входную последовательность  $(\dots, i_j, \dots, i_1, i_0)$  в выходную последовательность  $(y_1, y_2, \dots, y_k, \dots)$ , где  $y_k$  - выходной сигнал, выдаваемый комплексом  $(F, G, H)$  в момент времени  $k + 1$  при условии, что входные сигналы  $i_j$  поступали в каждый момент времени  $t = -j \leq 0$ , тогда как в каждый момент времени  $t$ ,  $1 \leq t \leq k$ , на вход поступали нулевые сигналы. Тогда  $f^\Delta$  можно назвать полной реакцией комплекса  $(F, G, H)$ .

Далее следует отметить, что при рассмотрении двух достижимых линейных вариантов математического описания КУБ:

$$M = (Q, F, I, G, Y, H) \text{ и } M' = (Q', F', I', G', Y', H'),$$

с общим пространством входных сигналов и общим пространством выходных сигналов, можно считать, что динамоморфизм  $h: (Q, F) \rightarrow (Q', F')$  является моделиро-

ванием комплекса  $M$  комплексом  $M'$ , если  $h$  отображает  $Q$  в  $Q'$  и если диаграмма

$$\begin{array}{ccccc} & G & & H & \\ I & \longrightarrow & Q & \longrightarrow & Y \\ & \searrow G' & \downarrow & \nearrow h & \\ & & Q' & & \end{array}$$

коммутативна. Можно также считать, что  $M$  и  $M'$  изоморфны, если существует моделирование  $h: Q \rightarrow Q'$ , являющееся также изоморфизмом векторных пространств, т.е. взаимно однозначное линейное отображение  $Q$  на  $Q'$ . Следует отметить, что если  $M$  моделирует  $M'$ , то  $M$  и  $M'$  обладают одинаковой системной реакцией, поскольку ясно, что тогда

$$H'(F')^k G' = H'(F')^k (hG) = H'h(F)^k G = H(F)^k G$$

в силу приведенной выше диаграммы и того факта, что  $h$  является динамоморфизмом ( $F'h = hF$ ).

Теперь можно рассмотреть проблему реализации – проблему нахождения КУБ с заданной реакцией. Можно считать, что  $M$  является реализацией

$$f: I^* \rightarrow Y$$

в том случае, если  $f$  есть системная реакция  $M$ .

Возможны два типа реализации отображения реакции  $f$ .

Система  $M'$  считается канонической реализацией отображения  $f$ , если она представляет собой достижимую реализацию  $f$ , которая является и наблюдаемой. Система  $M'$  считается минимальной реализацией отображения  $f$ , если она является достижимой реализацией  $f$ , такой что для каждой достижимой реализации  $M$  ото-

бражения  $f$  существует единственное моделирование  $M'$  системой  $M$ .

Можно доказать [66], что если принять  $I$  и  $Y$  как векторные пространства, а  $f: I^* \rightarrow Y$  как линейное отображение, то реализация отображения  $f$  является канонической тогда и только тогда, когда она минимальна, как и все такие реализации в математическом описании КУБ

$$M_f = (Q_f, F_f, I, G_f, Y, H_f),$$

где  $Q_f = \text{Im } f^\Delta$  (здесь  $f^\Delta$  – полная реакция динамоморфизма, порожденного  $f$ , для одного состояния в  $Q_f$  для каждой различной реакции  $f^\Delta(i)$ ),

$$F_f : Q_f \rightarrow Q_f, f^\Delta(i) \mapsto f^\Delta(zi),$$

$$G_f : I \rightarrow Q_f, i_0 \mapsto f^\Delta(..., 0, ..., 0, i_0) ,$$

$$H_f : Q_f \rightarrow Y, (y_0, y_1, ..., y_k, ...) \mapsto y_0$$

(т.е.  $H_f = \pi_0 : f^\Delta(i) \mapsto f(i)$ ).

Теперь, возвращаясь к проблеме формирования облика КУБ на основе концепции минимальной реализации пространств его состояний, можно утверждать, что для любого заданного динамоморфизма

$$f^\Delta : (I^*, z) \rightarrow (Y_*, z)$$

минимальную реализацию в категории *Vect* вещественных пространств и линейных отображений можно определить следующим образом:

разлагаем  $f^\Delta$  в композицию  $I^* \xrightarrow{e} Q_f \xrightarrow{m} Y_*$ ,

где  $Q_f = f^\Delta(I^*)$  – образ  $I^*$  относительно  $f^\Delta$ . Тогда  $e$  – отображение на  $Q$ :  $Q = r(I^*)$ , для которого  $\hat{i} \mapsto f^\Delta(\hat{i})$ , так что реализация является достижимой системой, и  $m$  – взаимно однозначное отображение  $q \mapsto \pi_0(q)$ , ко-

торое переводит  $f^\Delta(\hat{i})$  в  $f(\hat{i})$ , так что реализация является наблюдаемой. Далее следует определить  $F_f$  соотношением  $F_f e = ez$ ,  $G_f$  – соотношением  $G_f = e \circ in_0$ , а  $H_f$  просто как  $\pi_0 \circ m$ . Тогда математическое описание КУБ  $(Q_f, F_f, I, G_f, Y, H_f)$  будет минимальной реализацией для  $f^\Delta$ .

Следовательно, при формировании облика КУБ, имеющего способность к управлению безопасностью, необходимо обеспечить ему такие свойства, как наблюдаемость и распознаваемость опасных ситуаций.

Результат агрегирования свойств комплекса управления безопасностью, полученный в разделе 1, а также положения теории систем по вопросам управления позволяют составить граф основных компонент комплекса управления безопасностью НТО ТК и СК (рис. 2.2).

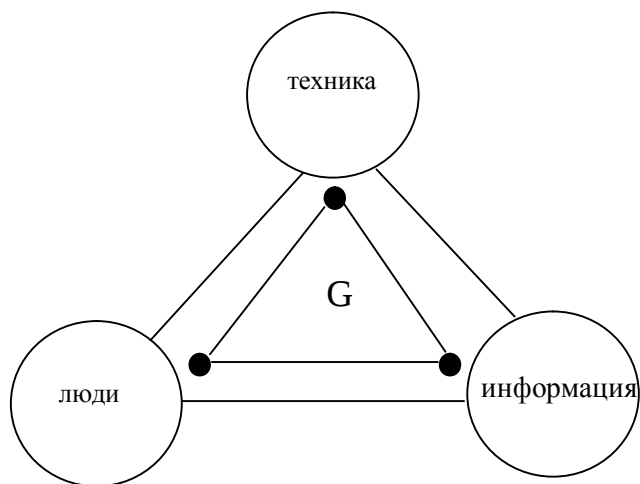


Рис. 2.2

Максимально полные графы этого графа, как известно [51], называются его кликами. Поскольку клика графа ( $G$ ) есть подмножество его вершин, такое что между парой вершин этого подмножества существует ребро и, кроме того, это подмножество не принадлежит никакому большему подмножеству с теми же свойствами. Клика графа ( $G$ ) представляет собой сочетание его основных компонент и является, по существу, одним из определяющих безопасность НТО ТК и СК этапов функционирования КУБ.

То обстоятельство, что в общем случае клика размера  $k$  порождается  $k!$  раз, позволяет для графа  $G$  (рис. 2.2.) получить шесть клик – шесть основных свойств, влияющих на безопасность НТО ТК и СК (рис. 2.3).

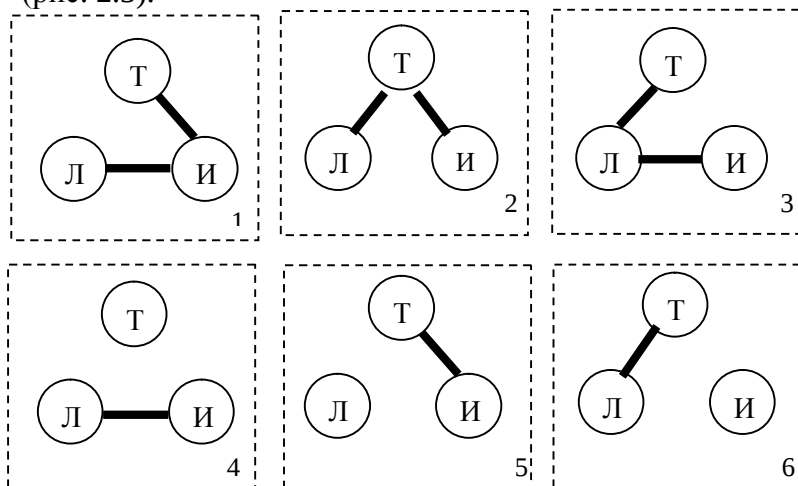
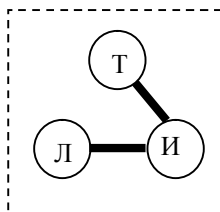


Рис. 2.3. Клики этапов формирования безопасности.

Л – люди; И - информация; Т – техника

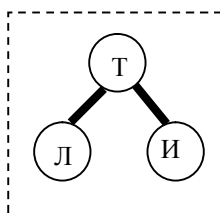
Определение принадлежности каждой из полученных клик тому или иному свойству КУБ может быть, согласно рис. 2.3, следующим:



Комбинация компонент КУБ,  
определяющая его свойство  
РАСПОЗНАВАЕМОСТИ.

Для приобретения этого свойства необходим показатель безопасности как по причине человеческого фактора, так и по причине технической опасности

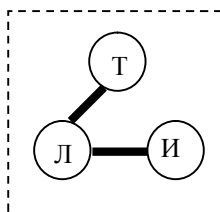
$$P_{безоп}^{техн} \cdot P_{безоп}^{чел}$$



Комбинация компонент КУБ,  
определяющая его свойство  
СПОСОБНОСТИ.

Для приобретения этого свойства необходимы: показатель эффективности функционирования НТО ТК и СК, а также показатель эффективности функционирования специальных технических средств обеспечения безопасности

$$P_{эф}^{ТО} \cdot P_{эф}^{СОБ}$$

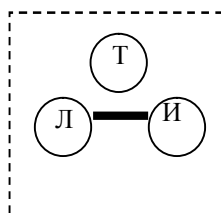


Комбинация компонент КУБ,  
определяющая его свойство  
НАБЛЮДАЕМОСТИ.

Для приобретения этого свойства необходим показатель работоспособности технических средств НТО ТК и СК

$$P_{работ}$$

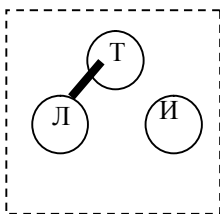
Остальные клики графа G могут иметь следующую трактовку:



Комбинация компонент КУБ,  
определяющая организацию безопасности эксплуатации НТО ТК и СК. Для оценивания этого элемента комплекса необходим показатель опасности, вызванной ошибками обслуживающего персонала,

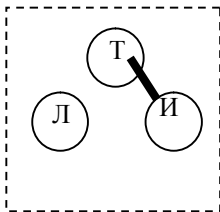
$$P_{безоп}^{чел}$$





Комбинация компонент КУБ, определяющая качество безопасной эксплуатации, включая такие аспекты как эффективность созданного НТО ТК и СК, эффективность специальных средств обеспечения безопасности и техническая безопасность, заложенная на проектном этапе создания НТО

$$P_{эф}^{ТО}, P_{эф}^{СОБ}, P_{безоп}^{техн}$$



Комбинация компонент КУБ, необходимая для оценивания текущего технического состояния НТО ТК и СК. Такое оценивание возможно при введении показателя работоспособности технических средств НТО

$$P_{работ}$$

Из вышеизложенного следует, что достижимость управления безопасностью НТО ТК и СК возможна при условии применения концепции минимальной реализации пространств состояний КУБ. При этом необходимыми свойствами КУБ должны стать: распознаваемость опасных ситуаций, наблюдаемость опасных факторов и способность парировать действие опасных факторов. Все эти свойства должны иметь показатели, способные адекватно оценивать НТО ТК и СК по вопросам безопасности создания и эксплуатации. Множество этих показателей состоит из следующего набора:

1. Показатель технической безопасности –  $P_{безоп}^{техн}$ .

2. Показатель безопасности по человеческому фактору –  $P_{безоп}^{чел}$ .

3. Показатель работоспособности технического оборудования НТО ТК и СК –  $P_{работ}$ .

4. Показатель эффективности функционирования НТО ТК и СК –  $P_{эф}^{ТО}$ .

5. Показатель эффективности функционирования специальных средств обеспечения безопасности –  $P_{эф}^{СОБ}$ .

Поскольку все перечисленные показатели описывают один объект, то процедура их формирования должна иметь единую методологическую основу.

### 2.3. Алгоритм формирования выражений для показателей, участвующих в оценивании безопасности

Нам представляется, что на пути формирования системы показателей безопасности вначале следует учесть, что факторы опасности разнообразны по физической природе. Для формализованного представления этих показателей необходимо, чтобы каждая из функций, описывающих соответствующий показатель, обладала общностью, физичностью, трактуемостью и представлялась в безразмерной метрике.

Определение выражений для этих функций должно начинаться с получения некоторого набора параметров. Для этого естественно использовать метод морфологического анализа [50] определяющих соответствующие показатели факторов, изложенных в нормативно-технической документации. Морфологический анализ предполагаемых для формирования КУБ требований позволяет не только агрегировать такие требования в систему независимых параметров, но и пополнить ее в случае необходимости недостающей информацией. Как показывает хронология формирования факторов опасности для НТО ТК и СК, их количество постоянно растет, и нет никаких оснований утверждать, что известный на сегодня набор таких факторов полон и правилен.

Если представить КУБ как целостный объект  $A$ , а множество факторов, определяющих опасность, описывающих условия работы НТО ТК и СК, которые в общем случае различаются, – системой  $S_a$ , то КУБ выступает как исходное понятие, а система  $S_a$  – как производное. Элементы системы  $S_a$  задаются в виде некото-

рой совокупности декомпозиций объектов и определений:

$$\bigoplus_{\textcircled{R}} A d R_k = \sum a(R_k), \quad (2.1)$$

где  $A$  – КУБ, рассматриваемый как целостный объект,  $\bigoplus_{\textcircled{R}}$  – знак операции декомпозиции, которая применяется  $k$  раз к объекту  $A$ ;  $d$  – знак операции цели;  $R_k$  – отношение, по которому проводится операция;  $R_k \subset \{R_k\}$ , где  $\{R_k\}$  – совокупность отношений некоторого уровня отношений  $U_A(R_k)$ , над которым вполне однозначно задается описание значений системы  $S_a$ ;  $\sum a(R_k)$  – совокупность свойств, выделяемых в объекте  $A$ , входящих в соотношения  $R_k \subset \{R_k\}$  и обладающих этими отношениями как признаками.

Выражение (2.1) формально описывает соответствие целостного объекта  $A$  совокупности элементов декомпозиции по отношению  $R_k$ . Система  $S_a$  задается композицией выделенных свойств и их показателей

$$\bigoplus_{\textcircled{C}} (\sum a(R_k)) d K_a = S_a, \quad (2.2)$$

где  $\bigoplus_{\textcircled{C}}$  – знак операции композиции;  $K_a$  – константа системы  $S_a$  (или системообразующее отношение) – постоянное отношение для любых значений  $S_a$ .

По мере накопления информации о факторах, влияющих на опасность функционирования НТО ТК и СК, формируется уровень отношений  $U_a(R_k)$ , пред-

ставляющий собой частично упорядоченную последовательность отношений  $\{R_k\}$ , которыми может быть описан любой из образов  $\{S_{aj}^0\}$ .

Одновременно при увеличении числа членов последовательности  $\{S_{aj}^0\}$  от  $j=1$  до  $j=n$  выделяется центральная информация  $I_{\text{ц}}$  рассматриваемого комплекса:

$$I_{\text{ц}} = \oint_{\text{C}} \left( \oint_{\text{R}} \text{Ad } S_{(n-1,n)}^0 \right) d K_A,$$

$$\text{где } S_{(n-1,n)}^0 = \oint_{\text{C}} \left( \oint_{\text{R}} \text{Ad } S_{(n-2,n-1)}^0 \right) d K_A,$$

принимаяющая при  $n=1$  значение  $I_{\text{ц}} = S_{a1}^0$ , и периферийная информация каждого значения

$$S_{aj}^0 : I_{\text{п}} = \oint_{\text{C}} S_{A,j}^{0,1} d K_a,$$

$$\text{где } S_{A,j}^{0,1} = \oint_{\text{R}} \oint_{\text{R}} S_{A,j}^0 d I_{\text{ц}} - I_{\text{ц}} = \oint_{\text{C}} S_{A,j}^0 d I_{\text{ц}}, \text{ и символом}$$

$\oint_{\text{R}} \oint_{\text{R}}$  обозначена полная двухместная декомпозиция по

М. Месаровичу [46].

Тогда периферийная информация рассматриваемого объекта  $S_A$  определяется через периферийную информацию отдельных образов последовательности  $\{S_{A,j}^0\}$

$$I_{\Pi} = \oint_{\odot} \left( \oint_{\odot} I_{\Pi}^j dK_A \right) dI_{\Pi}.$$

После определения периферийной информации производится ее расширение

$$I_{\Pi} \xrightarrow{U_A(R_k) \rightarrow U_A^*(R_k)} I_{\Pi}^*$$

путем включения в  $U_a^*(R_k)$  всех отношений из  $U_a(R_k)$  и отношений, альтернативных отношениям из  $U_a(R_k)$ .

Если уровень отношений  $U_a^*(R_k)$  определен, то есть строго определены тезаурус (система действующих ГОСТов), с которым оперирует создаваемый комплекс, и синтаксис построения образов  $\{S_{A,j}^0\}$ , то операция расширения  $I_{\Pi} \rightarrow I_{\Pi}^*$  и последующие операции однозначны и формализованы [50].

Полагая, что выделенные периферийная и центральная информация являются сверткой полной информации обо всех образах  $\{S_{A,j}^0\}$  объекта в системе формирования его облика, а развертки  $I_{\Pi}^*$  по  $I_{\Pi}$  являются обратной операцией, можно построить последовательность всех возможных значений возможных образов (свойств и параметров) комплекса над уровнем отношений  $U_a^*(R_k)$ .

Используя в качестве исходной информации совокупность изложенных в нормативно-технических документах факторов, описывающих соответствующее свойство, участвующее в оценивании опасности, а также термины и определения действующих ГОСТов, на основе процедуры морфологической декомпозиции их со-

держания можно построить классификационный граф для соответствующих определяющих то или иное свойство параметров (рис. 2.3), где  $S_{A,i}^0$  – определяющие показатели.

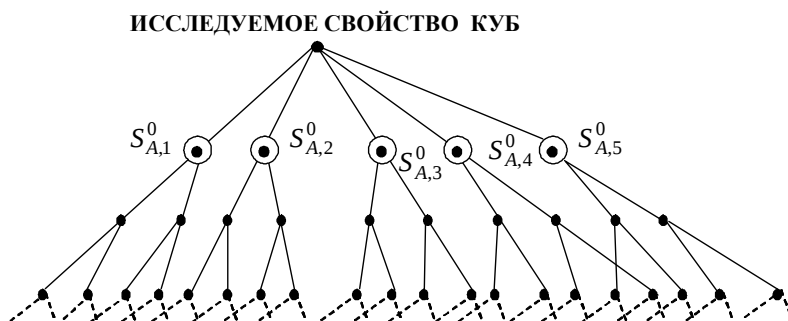


Рис. 2.4. Классификационный граф

Эта процедура выявляет в качестве центральной информации (определяющих параметров) параметры по алгоритму, показанному на рис. 2.4.

Таким образом, мы можем описать функцию результата по оцениванию  $i^{2o}$  свойства  $Y_i$ , которая имеет в качестве аргументов определяющие параметры, полученные на основании имеющегося тезауруса

$$Y_i = f(P_1, P_2, P_3, P_4, \dots, P_n).$$

Некоторые из этих параметров могут быть переменными, другие – постоянными. Для выяснения структуры этой функции привлекается аппарат анализа размерности, согласно которому всякое соотношение между размерными величинами можно сформулировать как соотношение между безразмерными величинами.

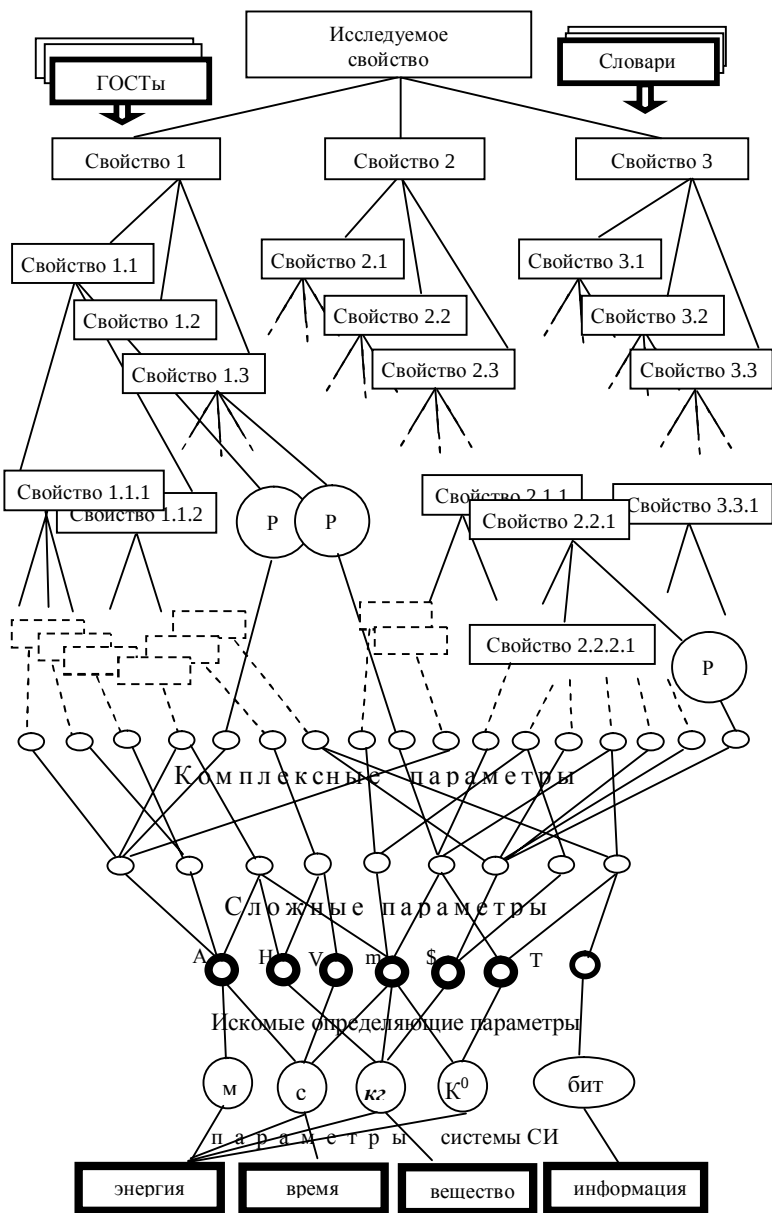


Рис. 2.5



Согласно П-теореме [53], если известно, что рассматриваемая безразмерная величина является функцией ряда размерных величин, то эта функция может зависеть только от безразмерных комбинаций, составленных из  $n$  определяющих размерных величин:

$$Y = f(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n),$$

где  $\pi_i$  – комбинации определяющих параметров  $p_i$ , имеющих нулевую размерность  $[\pi] = 0$ ,

$$\pi = p_1^{z_1} p_2^{z_2} \dots p_n^{z_n} = \text{const } [p_1]^{z_1} [p_2]^{z_2} \dots [p_n]^{z_n}.$$

Если число  $n$  основных единиц измерения равно числу  $k$  определяющих параметров, которые имеют независимые размерности, то с помощью анализа размерности эта зависимость полностью определяется с точностью до постоянного множителя:

$$Y = \text{const } p_1^{m_1} p_2^{m_2} \dots p_n^{m_n}.$$

Таким образом, решение задачи зависит от определения числа основных (независимых) единиц измерения.

Как известно, для условия независимости единиц измерения, невозможности выразить один из параметров через другие, имеется выражение типа

$$[p_1] \neq [p_2]^\alpha [p_3]^\beta [p_4]^\gamma [p_5]^\mu.$$

В том случае если  $n > k$ , структура искомой зависимости определяется по правилу

$$Y = f(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n),$$

которое свидетельствует о недостаточном наборе основных параметров. Такая недостаточность исходной информации, как правило, сопровождается описанием рассматриваемых свойств, что мы обсуждали при описывании полноты множества параметров КУБ. Поэтому в

дополнение к полученным показателям необходимо вводить дополнительные параметры, которые, с одной стороны, позволят выполнить условия П-теоремы, с другой стороны, будут иметь прозрачный физический смысл при описании соответствующих свойств.

В соответствии с выводами анализа размерности безразмерных комплексов для функций требуемого и реального результата по соответствующему свойству можно получить выражения

$$Y_{реал} = const \cdot (P_{реал}^{n_1} \cdot P_{реал}^{n_2} \dots P_{реал}^{n_m}) \text{ и}$$

$$Y_{тр} = const \cdot (P_{тр}^{n_1} \cdot P_{тр}^{n_2} \dots P_{тр}^{n_m}),$$

имеющие нулевую размерность.

При соблюдении очевидного соотношения, свидетельствующего о том, что желаемого свойства можно достичь лишь в идеале,

$$Y_{реал} < Y_{тр},$$

выражение для соответствующего показателя представ-  
ляется в виде

$$\Pi_i = \frac{Y_{реал}}{Y_{тр}}.$$

Здесь же возникает вопрос об эталонном значении требуемого результата ( $Y_{тр}$ ), которое в каждом случае назначается по своим правилам.

Общая схема построения таких показателей пред-  
ставлена на рис. 2.5.

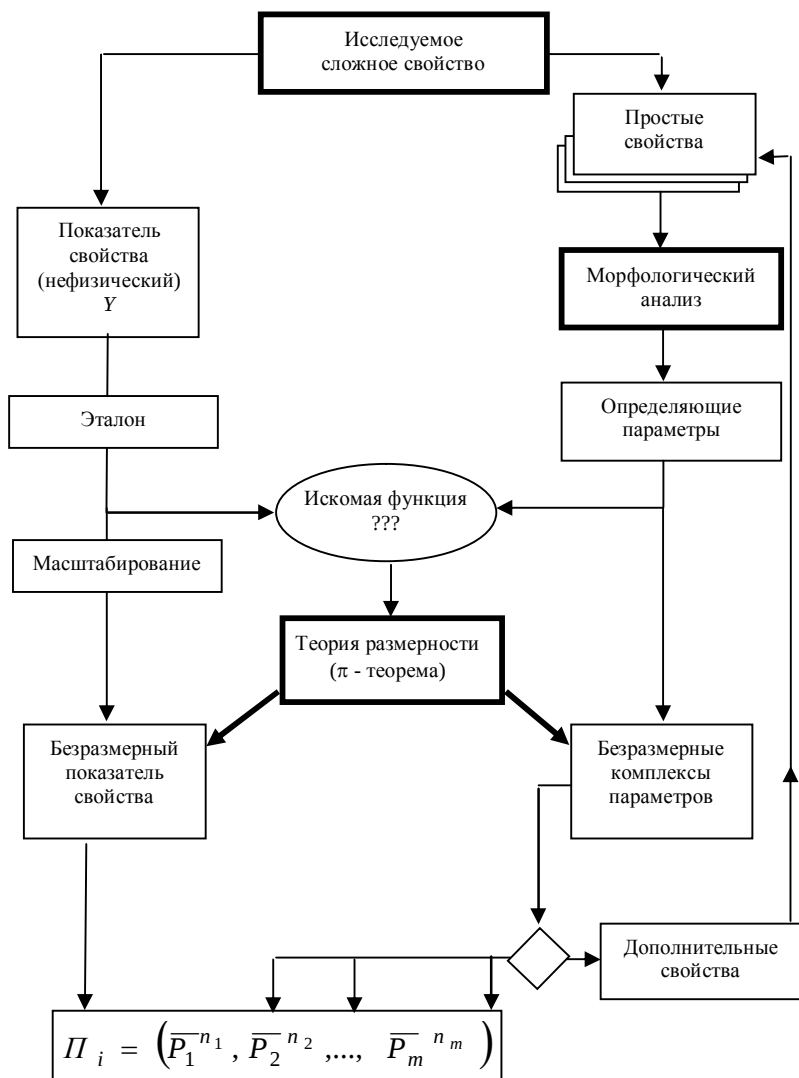


Рис. 2.6.

## 2.4. Семантические особенности описания безопасности

Многообразие аспектов проблемы обеспечения функционирования НТО ТК и СК указывает на необходимость исследования ее с единых общенаучных позиций на основе общности применяемых понятий, терминов и определений. В настоящее время основные понятия рассматриваемой проблемы: «безопасность», «безопасное состояние», «опасность», «опасное состояние», «угроза», «ущерб», «риск» и пр. – в нормативно-технических документах [67, 68, 69÷72, 74÷77] и научно-технической литературе [78÷83, 10, 36] истолковываются неоднозначно, а порой и некорректно, что приводит к применению различных моделей и методов, рекомендуемых для исследования безопасности как свойства НТО ТК и СК. Для однозначности и полной ясности дальнейших исследований определение понятия «безопасность» и связанных с ним терминов проведем на основе [84]. Необходимо отметить, что дальнейшие рассуждения направлены на конкретизацию терминов и определений, которые, с одной стороны, учитывали бы особенности и свойства КУБ, процессов его функционирования и свойства среды, а с другой стороны, нашли бы адекватное отражение в показателях, в моделях и методах исследования, а также в основных аспектах, связанных с проблемой обеспечения НТО ТК и СК.

Понятие «безопасность» в широком смысле этого слова законодательно закреплено в Законе РФ «О безопасности» от 5.03.92 № 2426-1 и определено как «состояние защищенности жизненно важных интересов личности, общества и государства от внутренних и внешних угроз».

В конкретных отраслях гражданского и оборонного комплексов, в узком общетехническом смысле, понятие «безопасность» рассматривается в различных формулировках. Безопасность производственного процесса определяется как свойство производственного процесса сохранять безопасное состояние при протекании в заданных параметрах в течение установленного времени [67]. Под безопасностью производственного оборудования понимается свойство оборудования сохранять безопасное состояние при выполнении заданных функций в определенных условиях в течение установленного времени [67]. Безопасность полетов рассматривается как комплексная характеристика воздушного транспорта и авиационных работ, определяющая способность выполнять полеты без угрозы для жизни и здоровья людей [79]. Под безопасностью экипажа в космическом полете понимается совокупность свойств космического комплекса и привлекаемых технических средств, обеспечивающих работоспособность космонавтов и исключающих ухудшение состояния здоровья или гибель космонавтов на всех этапах космического полета, а также обеспечивающих их возвращение на Землю без опасных для здоровья последствий [36].

Нам видится, что представленные выше определения в одних случаях носят достаточно общий, в других – односторонний характер, обладают определенной семантической некорректностью, так как безопасность можно рассматривать только лишь как свойство процесса, проявляемое при взаимодействии исследуемого объекта и среды, при котором отсутствует нанесение вреда. Последнее утверждение вытекает из анализа определенных понятий «безопасность», «безопасный», «опасность», «опасный» в соответствии с [79]. Согласно [79] «безопасность – состояние, при котором не угрожает

опасность, есть защита от опасности», «безопасный – не угрожающий опасностью, защищающий от опасности», «опасность – возможность, угроза чего-нибудь очень плохого, какого-нибудь несчастья», «опасный – способный вызвать, причинить какой-нибудь вред, несчастье».

Учитывая вышесказанное, в дальнейших рассуждениях будем применять лишь понятие безопасности процессов функционирования НТО ТК и СК, учитывающее отношения взаимодействующих комплексов и среды. Необходимо отметить, что процесс данного взаимодействия двойственно определяется как со стороны комплексов, так и со стороны среды. Причем под субстратом опасности следует понимать опасные факторы, воздействие которых на СК и ТК приводят к нанесению им вреда.

Здесь и далее под опасным фактором функционирования комплексов понимается фактор, воздействие которого на среду может привести к нанесению ей вреда, при этом комплексы выступают в качестве объектов (субъектов) безопасности.

Отдельно необходимо остановиться на таких свойствах комплексов и среды, как стойкость и защищенность. При этом под стойкостью комплекса понимается его свойство выполнять свои функции и сохранять свои параметры в пределах установленных норм, а под защищенностью – свойство комплекса совместно со средствами внешней защиты противостоять воздействию внешних факторов и сохранять работоспособное состояние.

Понятие «ущерб» является синонимом понятию «вред» [79] и носит более технический характер, поэтому будет далее применяться в данной работе.

Так как объектом проводимого исследования является КУБ, то в дальнейшем рассматриваются только

вопросы, касающиеся безопасности НТО ТК и СК и ее обеспечения средствами КУБ.

Как было обсуждено ранее, исследование безопасности НТО ТК и СК строится на применении концепции «приемлемого (допустимого) риска». Поэтому здесь мы принимаем:

Определение. Безопасность процесса функционирования НТО ТК и СК – это свойство процессов функционирования, характеризующее их способность не наносить ущерб НТО и среде, превышающий допустимые величины.

Определение. Безопасное функционирование НТО ТК и СК – это процесс смены состояний НТО, при которых не наносится ущерб НТО и (или) среде, превышающий допустимые величины.

Под ущербом понимаются потери, которые наносятся НТО и среде. Ущерб больше допустимой величины будем называть критическим ущербом.

Определение. Критический ущерб – ущерб, который в пределах проводимого исследования превышает допустимые величины.

Рассматривая функционирование НТО ТК и СК как процесс взаимодействия НТО и среды, необходимо учитывать не только вещественные и энергетические потоки обмена между ними, но и потоки, циркулирующие в самом комплексе, при этом их интенсивность характеризует потенциальную опасность процесса. Потенциальная опасность единственна и заключается в возможности воздействия опасных факторов на объект (субъект), по отношению к которому она сформулирована.

Ресурсы различных видов, используемые при функционировании НТО, принято называть ингредиентами [85]. Вещественные и энергетические ресурсы, потребление которых в процессе функционирования НТО может привести к нанесению ущерба, будем называть опасными ингредиентами.

Чтобы быть последовательным в дальнейших рассуждениях, необходимо ответить еще на следующие вопросы:

1. Как назначить ту границу «НТО ТК и СК – среда», которая определяет процессы, сопровождающиеся действием опасных факторов, и частные объекты безопасности?

2. Как определить величину (масштаб, уровень) ущерба, при котором функционирование НТО можно считать безопасным?

Здесь принято, что под средой понимается совокупность элементов окружающего НТО ТК и СК мира, не входящих в их состав, но оказывающих на них то или иное воздействие. Так как НТО функционирует в среде, то она может также рассматриваться как подсистема некоторой более общей системы, содержащей в своем составе среду, окружающую данную систему. Из этого следует, что выделение НТО ТК и СК из среды связано с идеализацией материального мира и решение данного вопроса напрямую зависит от цели и задач исследования. Поэтому при описании безопасности НТО ТК и СК в состав комплексов включаются те элементы, которые, с одной стороны, определяют его как целостное образование, взаимодействующее со средой и обеспечивающее достижение цели его функционирования, с другой стороны, формируют характерное с точки зрения данного исследования свойство безопасности – исключение воз-



возможности нанесения ущерба НТО ТК и СК, а также среде.

Далее здесь принято, что, одной стороны, величина допустимого ущерба отдельно взятым элементам НТО и среде определяется предельно допустимыми значениями параметров опасных факторов, которые зависят от значений стойкости и защищенности НТО и от воздействия данных факторов. При этом необходимо отметить, что предельно допустимые значения параметров опасных факторов для различных элементов (объектов безопасности), входящих в состав СК и ТК, а также среды, различны и должны определяться при парном рассмотрении взаимодействия конкретного опасного фактора и конкретного элемента НТО и среды. С другой стороны, для НТО и среды в целом величина допустимого ущерба будет определяться их живучестью, при этом исходя из концепции «приемлемого риска» необходимо учитывать субъективный фактор приемлемости величины критического ущерба.

Для этого введем следующие термины:

✓ Источник опасности процессов функционирования НТО ТК и СК – элемент комплекса, использующий (потребляющий) при функционировании опасные ингредиенты.

✓ Причина возникновения опасной ситуации – исходные события перехода от безопасной ситуации к опасной. В качестве исходных событий возникновения опасных ситуаций могут выступать:

- отказы элементов НТО, входящего в состав комплекса, в том числе ошибки обслуживающего персонала (изменение свойств системы);
- изменение условий функционирования НТО ТК и СК (изменение свойств среды).

## **2.5. Показатель безопасности функционирования технологического оборудования технических и стартовых комплексов**

Глобальной целью процессов функционирования НТО ТК и СК является подготовка и испытание уникальных изделий. С точки зрения целей исследования целенаправленный процесс функционирования комплексов [86] может быть условно разделен на два смежных по времени и логически связанных процесса:

- процесс применения наземного комплекса по назначению;

- процесс обеспечения безопасности процессов функционирования комплексов.

В ходе процесса функционирования комплексов НТО реализуется выполнение задач их применения по назначению. В ходе обеспечения безопасности процессов функционирования комплексов реализуются задачи по управлению их состоянием. Результаты процесса обеспечения безопасности процессов функционирования комплексов проявляются в ходе процесса их применения по назначению и в существенной степени определяют качество выполнения целевых задач. Результативность процесса обеспечения безопасности процессов функционирования комплексов НТО определяется характеристиками комплексов, в том числе и характеристиками системы обеспечения безопасности процесса функционирования. Безопасность как свойство процесса функционирования комплексов проявляется только при выполнении операции, то есть в процессе их эксплуатации.

Ключевой проблемой обеспечения безопасности процессов функционирования комплексов НТО является корректная и обоснованная формулировка задач, стоящих перед процессом их функционирования, от которой зависит правильность выводов об эффективности КУБ. Для этого необходимо определить существенные эффекты процессов функционирования комплексов НТО и требования к ним.

В процессе функционирования наземного комплекса в качестве таких эффектов фигурируют:

- 1) прямой положительный эффект – осуществление успешной подготовки и пуска РКН;
- 2) побочный отрицательный эффект – нанесение ущерба за время процессов функционирования НТО ТК и СК.

Таким образом, в качестве целевых эффектов процесса функционирования НТО ТК и СК с позиций обеспечения их безопасности необходимо рассматривать подготовку РКН и предотвращенный ущерб при подготовке и выполнении пуска РКН.

Цели, которые формируются вне наземного комплекса, рассматриваются как несобственные цели, а соответствующие показатели, характеризующие эффект при достижении несобственных целей, целесообразно назвать несобственными показателями эффекта. Несобственные показатели эффекта процесса функционирования наземного комплекса представляют собой меру полезного эффекта, потребляемого системой более высокого уровня – суперсистемой, то есть КРК в целом.

Цели, которые направлены на достижение несобственных целей и формируются в рамках наземного комплекса, являются собственными целями. Показатели, характеризующие эффект при достижении собст-

венных целей, можно называть собственными показателями эффекта.

Деление целей процесса функционирования наземного комплекса на несобственные и собственные можно трактовать как отражение внешних и внутренних связей и характеризовать как внешние и внутренние цели.

Таким образом, в качестве показателей эффектов обеспечения безопасности процессов функционирования наземного комплекса, учитывающих его несобственные и собственные цели, могут быть использованы:

$\mathcal{E}^n$  – показатель, характеризующий успешность подготовки и пуска РКН;

$\mathcal{E}^c$  – показатель, характеризующий фактический уровень предотвращенного ущерба в процессе функционирования наземного комплекса.

Введем в рассмотрение безразмерный нормированный показатель безопасности процессов функционирования наземного комплекса –  $\bar{P}_{\text{безопасно}}$ , определяемый по следующему выражению:

$$\bar{P}_{\text{безопасно}} = \frac{\mathcal{E}^c}{\mathcal{E}_{\text{max}}^c}, \quad (2.3)$$

где  $\mathcal{E}_{\text{max}}^c$  – показатель, характеризующий уровень максимально возможного предотвращенного ущерба.

Необходимо отметить, что значения показателей  $\mathcal{E}^c$ ,  $\mathcal{E}_{\text{max}}^c$ ,  $\bar{P}_{\text{безопасно}}$  непосредственно связаны с показателями  $U$ ,  $U_{\text{max}}$ ,  $\bar{P}_{\text{опасно}}$ , характеризующими уровни наносимого ущерба ( $U$ ), максимально возможного

ущерба ( $U_{\max}$ ) и опасности процесса функционирования наземного комплекса ( $\bar{P}_{\text{опасно}}$ ) соответственно, а также временем процесса функционирования наземного комплекса. Качественный анализ взаимной зависимости данных показателей (рис. 2.6 и 2.7) позволяет сделать следующие выводы:

$$1) \bar{P}_{\text{безопасно}} \in [0;1];$$

$$2) \bar{P}_{\text{безопасно}} + \bar{P}_{\text{опасно}} = 1;$$

$$3) U + \mathcal{E}^c = U_{\max} = \mathcal{E}_{\max}^c ;$$

$$4) \bar{P}_{\text{безопасно}}^{\partial} = \frac{\mathcal{E}_{\text{кр}}^c}{\mathcal{E}_{\max}^c} = \frac{U_{\max} - U_{\text{кр}}}{U_{\max}} = 1 - \frac{U_{\text{кр}}}{U_{\max}}, \quad (2.4)$$

где  $\bar{P}_{\text{опасно}}$  – безразмерный нормированный показатель опасности процесса функционирования наземного комплекса;

$\bar{P}_{\text{безопасно}}^{\partial}$  – допустимое значение показателя безопасности процесса функционирования наземного комплекса;

$U$ ,  $U_{\max}$ ,  $U_{\text{кр}}$  – показатели, характеризующие уровни нанесенных фактического, максимально возможного и критического ущербов.

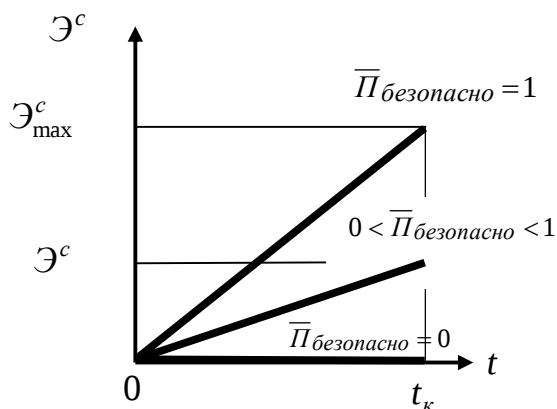


Рис. 2.7. Зависимость уровня предотвращенного ущерба от времени процесса функционирования наземного комплекса

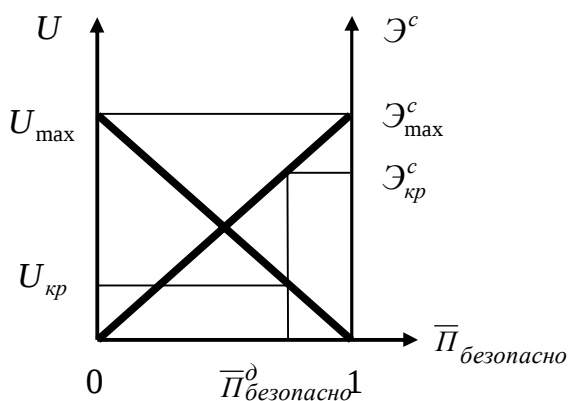


Рис. 2.8. Зависимость уровня предотвращенного ущерба и наносимого ущерба от нормированного показателя безопасности процесса функционирования наземного комплекса

КУБ является обеспечивающей системой, цель которой состоит в обеспечении эффективного функционирования наземного комплекса. Он относится к системам с промежуточным производимым эффектом. Эффект от функционирования КУБ потребляется наземным комплексом, с которым он находится в отношении подчиненности и который формирует цели его функционирования.

Несобственные показатели эффекта функционирования КУБ представляют собой меру полезного эффекта, потребляемого системой более высокого уровня – КРК. Для получения указанного эффекта при своем функционировании КУБ расходует ресурсы, предоставленные в его распоряжение. При правильной организации функционирования КУБ и его взаимодействия с другими системами (агрегатами) наземного комплекса должен обеспечиваться расход доступного количества ресурсов, поэтому под собственной целью КУБ следует понимать расходование доступного количества ресурсов всех видов. Такая формулировка собственной цели является следствием общего принципа наименьшего действия, широко используемого в технике [50].

Далее следует рассмотреть вопрос об определении величины критического ущерба. Чрезвычайная важность ответа на данный вопрос обусловлена необходимостью в обосновании условий перехода опасных ситуаций в чрезвычайные, т.е. «критериев» происшествий.

Для определения уровня критического ущерба воспользуемся классификацией происшествий по объектовому признаку. Анализ состава наземного комплекса и среды позволяет условно выделить три вида ущерба, сформулированных по отношению к объектам безопасности:

- ущерб обслуживающему персоналу, который проявляется в снижении качества жизни (заболеваниях или смерти людей);

- ущерб наземному комплексу и техногенной среде, в том числе и РКН, который связан с изменениями структуры и характеристик наземного комплекса и затратами на их восстановление;

- ущерб природной среде (экосистеме района, в котором функционирует наземный комплекс), связанный с изменениями структуры и характеристик природной среды и затратами на их восстановление.

Необходимо отметить, что нанесение каждого из вышеперечисленных ущербов оказывает влияние на достижение несобственной цели процесса функционирования наземного комплекса и может привести к невыполнению операций подготовки и пуска РКН в течение заданного времени, которое рассматривается как нанесение ущерба особого вида.

Поскольку обычно ущерб исчисляют интегрально, то представляется, что его оценивание в денежном эквиваленте, на первый взгляд, значительно упрощает задачу. Однако подобное упрощение не адекватно реальной ситуации по следующим причинам:

- 1) исчисление ущерба в денежном эквиваленте является достаточно субъективным, так как зависит от социально-политических, экономических, конъюнктурных и прочих условий;

- 2) исчисление ущерба здоровью и жизни человека, природной среде в большинстве случаев тесно связано с факторами, которые трудно формализуемы и практически не поддаются учету;

- 3) в дополнение к предыдущему пункту, исчисление ущерба здоровью человека и тем более ущерба, свя-



занного с его смертью, в денежном эквиваленте является не вполне уместным из этических и гуманных соображений;

4) задача определения уровня ущерба не может и не должна рассматриваться как получение единой интегральной оценки, так как в реальных условиях применения наземного комплекса она сугубо индивидуальна.

Учитывая особенности компоновочной структуры территории объектов НТО ТК и СК и, как правило, достаточную их удаленность от объектов инфраструктуры КРК, мы в качестве единственного объекта безопасности, являющегося элементом техногенной среды, будем рассматривать РКН.

Так как районы размещения существующих СК и ТК являются «зонами отчуждения», то уровень критичного ущерба, наносимого природной среде, может быть охарактеризован как уровень воздействий опасных факторов, под влиянием которых происходит деградация экосистемы района, где размещен наземный комплекс. Во времени этот ущерб накапливается и закрепляются неблагоприятные изменения состояний динамического равновесия района. Таким образом, уровень критичного ущерба природной среде (экосистеме района для размещения наземного комплекса) определяется интенсивностью воздействий, при которых накопление данных неблагоприятных изменений грозит ее деградацией, то есть необходимостью использования дополнительных средств защиты обслуживающего персонала при эксплуатации наземного комплекса. Если в основу рассуждений положить допущение о том, что слабейшим звеном биосферы является человек, а элементы экосистем, как правило, обладают существенно более высокой резистентностью, чем человек, то уровень критичного

ущерба природной среде поглощается уровнем критичного ущерба человеку.

Для дальнейшего определения величины критического ущерба представленные выше рассуждения позволяют выделить следующие группы происшествий и соответствующих им чрезвычайных ситуаций, возможных в процессах функционирования наземных комплексов:

- 1) гибель одного (нескольких) человек из обслуживающего персонала;
- 2) повреждение оборудования наземного комплекса, связанное со срывом программы подготовки и пуска РКН;
- 3) повреждение РКН, связанное со срывом программы подготовки и пуска.

Условие нанесения критического ущерба человеку (одному из обслуживающего персонала), которое проявляется в его гибели, может быть представлено в следующем виде:

$$G : (x'_{ij} > x'^{\partial}_{ij}) \vee (t(x''_{ij}) > t^{\partial}(x''_{ij})),$$

где  $x'_{ij}$  – значение параметра, характеризующего воздействие  $i$ -го мгновенного опасного фактора на  $j$ -го человека;

$x'^{\partial}_{ij}$  – допустимое значение параметра, характеризующего воздействие  $i$ -го мгновенного опасного фактора, при котором наступает смерть  $j$ -го человека;

$x''_{ij}$  – значение параметра, характеризующего воздействие  $i$ -го длительного опасного фактора, при котором он способен наносить ущерб здоровью  $j$ -го человека;

$t$  – время, в течение которого  $i$ -й длительный опасный фактор наносит ущерб здоровью  $j$ -го человека;

$t^{\partial}$  – допустимое время воздействия  $i$ -го длительного опасного фактора, при котором нанесенный данным фактором ущерб здоровью  $j$ -го человека не приводит к его смерти.

Аналогичным образом описываются условия нанесения ущерба оборудованию испытательного комплекса и элементам испытываемого изделия.

Введем в рассмотрение характеристику относительного ущерба  $\bar{U}$ , служащую показателем нанесения ущерба объекту безопасности:

$$\bar{U} = \frac{U}{U_{\max}}.$$

Тогда показатель относительного критического ущерба  $\bar{U}_{кр}$  можно записать в виде:

$$\bar{U}_{кр} = \frac{U_{кр}}{U_{\max}}. \quad (2.5)$$

Введение такого показателя позволяет в формализованном виде представить условия возникновения происшествий, связанных с нанесением ущерба вышеперечисленным объектам безопасности, и определить соответствующую для них величину критического ущерба.

Интегральный показатель относительного критического ущерба  $\bar{U}_{кр\langle 3 \rangle}$  будет рассматриваться как вектор показателей относительных критических ущербов для различных объектов безопасности:

$$\bar{U}_{кр\langle 3 \rangle} = \left\langle \bar{U}_{кр}^{обслперсон}, \bar{U}_{кр}^{ТО}, \bar{U}_{кр}^{РКН} \right\rangle, \quad (2.6)$$

где  $\bar{U}_{кр}^{обслперсон}$ ,  $\bar{U}_{кр}^{ТО}$ ,  $\bar{U}_{кр}^{РКН}$  – показатели относительного критического ущерба для обслуживающего персонала, наземного комплекса и РКН соответственно.

Анализ нормативно-технических документов [71,72] показывает, что в настоящее время не существует нормативно закреплённых требований к безопасности процессов функционирования наземных комплексов и соответствующих подходов к ее нормированию. Именно поэтому попытки такие требования предъявить и даже продекларировать в нормативных документах (например, в [72]) оказываются не всегда удачными, так как опираются на принципы концепции «абсолютной безопасности».

Важным в наших рассуждениях является понятие «риска», которое в последнее время находит широкое применение в политической, экономической, социальной и военной областях человеческой деятельности. Понятие «риск» в настоящее время является неустоявшимся, используется в самых различных смыслах, и в него иногда вкладываются довольно сильно отличающиеся друг от друга содержания.

Согласно [79] «риск – возможность опасности, неудачи». Таким образом, общим для всех определений понятия «риск» является то, что они включают неуверенность, неопределенность, произойдет ли нежелательное событие при достижении определенной цели. Однако нельзя забывать и о другой, противоположной стороне риска, о возможности удачи, успеха. Очевидно, в данном случае уместно говорить о некоем конечном результате (эффекте) при достижении определенной цели, то есть о возможности получения положительного (позитивного) целевого эффекта. Необходимо отметить, что понятие риска на сегодняшний день является одним из основных понятий теории принятия решений. Когда говорят о принятии решений в условиях риска [87], обычно предполагают, что каждому варианту действия соответствует свое распределение вероятностей

на множестве исходов (результатов). При этом если множества вариантов действия и исходов конечны, то под риском понимается количественная характеристика наступления каждого исхода, возможного при выборе данного варианта действия. В соответствии с [70] под риском понимается сочетание вероятности события и его последствия.

Учитывая вышесказанное, под риском следует понимать оценку реализации всех неблагоприятных исходов при принятии конкретного варианта действия (решения), которая является сочетанием оценок возможности их возникновения и наносимого ущерба.

Также необходимо обратить внимание на субъективно-объективную природу риска. Субъективно-объективная природа риска определяется тем, что он порождается как процессами субъективного характера, так и такими, существование которых не зависит от воли и сознания человека. Субъективная сторона риска проявляется в праве субъекта выбирать свою степень риска (величины критического ущерба), а также в благоприятном или неблагоприятном отношении субъектов к допускаемому риску. Объективность риска проявляется в том, что это понятие отражает реально существующие в жизни явления, процессы. Причем риск существует независимо от того, осознают ли его наличие или нет, учитывают или игнорируют его. Однако существование риска непосредственно связано с наличием неопределенности, которая неоднородна по форме проявления и по содержанию.

Рассмотренные положения концепции «приемлемого риска», а также понятия «риск» позволяют предложить подход к нормированию показателя безопасности процессов функционирования наземного комплекса, основанный на определении уровня возможности нане-

сения критического ущерба в процессе функционирования этого комплекса [88].

Преобразуя выражение (2.5) с учетом соотношения (2.6), получим

$$\overline{P}_{\text{безопасно}}^{\partial} = 1 - \overline{U}_{\text{кр}}. \quad (2.7)$$

Так как значение показателя  $\overline{U}_{\text{кр}}$  определяется отдельно для различных групп объектов безопасности (обслуживающего персонала, оборудования наземного комплекса, РКН или изделия), то показатель  $\overline{P}_{\text{безопасно}}^{\partial}$  также должен определяться отдельно:

$$\begin{cases} \overline{P}_{\text{безопасно}}^{\partial TO} = 1 - \overline{U}_{\text{кр}}^{TO} \\ \overline{P}_{\text{безопасно}}^{\partial \text{персонал}} = 1 - \overline{U}_{\text{кр}}^{\text{персонал}} \\ \overline{P}_{\text{безопасно}}^{\partial \text{РКН}} = 1 - \overline{U}_{\text{кр}}^{\text{РКН}} \end{cases}, \quad (2.8)$$

а интегральный показатель  $\overline{P}_{\text{безопасно}\langle 3 \rangle}^{\partial}$  рассматриваться как вектор вида:

$$\overline{P}_{\text{безопасно}\langle 3 \rangle}^{\partial} = \left\langle \overline{P}_{\text{безопасно}}^{\partial \text{персонал}}, \overline{P}_{\text{безопасно}}^{\partial TO}, \overline{P}_{\text{безопасно}}^{\partial \text{изделие}} \right\rangle. \quad (2.9)$$

Приняв описанные в [п. 2.4](#) понятия, можно приступить к формированию показателей безопасности процессов функционирования НТО ТК и СК.

Используя в качестве исходной информации совокупность изложенных в нормативно-технических документах факторов опасности [72]:

- механического;

- электрического;
- химического;
- биологического;
- взрывного (ударно-волнового);
- пожарного;
- электромагнитного излучения;
- теплового;
- функционального;
- токсичного;
- ядерного;
- сейсмического;
- климатического,

можно выполнить процедуру морфологической декомпозиции их содержания. Эта процедура, описанная в п. 2.3, позволяет выявить следующие определяющие параметры:

- неконтролируемую высвобождаемую энергию  $E$  (тепловую, механическую, взрывных волн, электромагнитную и т. д.);

- неконтролируемое высвобождение опасных веществ  $m$  (химически опасных);

- неконтролируемое распространение или нарушение потоков информации  $I$  (управляющей, оповещающей, предупреждающей);

- вероятность возникновения аварии и катастрофы  $P$ ;

- время действия опасных факторов  $t_b$ .

Таким образом, мы можем описать величину показателя опасности ( $\Pi_{опасно}^{TO}$ ), которая является функцией определяющих параметров опасности, полученной на

основании имеющегося тезауруса

$$\Pi_{\text{опасно}}^{TO} = f(E, m, I, t_b, P).$$

Очевидно, что для полученного набора определяющих параметров ( $n = 5$ )

$$E, m, I, t_b, P$$

единицы измерения следующие:

$$[E] = \text{Дж}, [m] = \text{кг}, [t] = \text{с}, [I] = \text{бит}, [P] = 0.$$

Независимыми для этого набора единицами являются ( $k = 3$ ):

$$[t] = \text{с}, [m] = \text{кг}, [H] = \text{м}.$$

Следовательно, мы имеем дело со случаем ( $n > k$ ), при котором структура искомой зависимости определяется по правилу

$$\Pi = f(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n).$$

Из имеющегося набора независимых параметров невозможно получить два ( $n - k$ ) необходимых безразмерных комплекса ( $\pi_1, \pi_2$ ). Следовательно, мы имеем дело с недостаточным набором основных параметров. Такая недостаточность исходной информации ожидалась нами, когда мы обсуждали полноту множества факторов опасности. Поэтому в дополнение к полученным показателям необходимо ввести такие показатели, которые, с одной стороны, позволят выполнить условия П-теоремы, а с другой стороны, будут иметь прозрачный физический смысл при описании действий факторов опасности. В качестве таких параметров предлагается использовать:

- площадь поражения исследуемого объекта опасными факторами –  $F$  ;
- энергию, которая может быть рассеяна (погло-



цена) техническими средствами ТК и СК, –  $E_s$ .

Площадь поражения даже слабыми по воздействию факторами опасности следует рассматривать как существенный показатель опасности, от которого зависит уровень ущерба. Энергия диссипации высвобождаемого потока энергии характеризует такое свойство технического средства, как стойкость (защищенность). Каждый структурно устойчивый объект может противостоять какому-то внешнему воздействию. Без этого параметра решение проблемы обеспечения безопасности можно считать некорректным.

Следовательно, совокупность основных параметров, определяющих опасность для НТО ТК и СК, составит набор:

$$E, m, I, t_b, P, F, E_s, \quad (2.10)$$

который для выполнения условий П-теоремы агрегируется в следующие показатели:

$$N = \frac{E}{t_b}; G = \frac{m}{t_b}; I; P(t); F; E_s. \quad (2.11)$$

Здесь  $N$  – мощность опасного потока энергии;  $G$  – расход опасного вещества.

Дополнительные параметры не меняют полученные ранее выводы П-теоремы, следовательно, безразмерная функция опасности может быть записана в виде:

$$\Pi_{\text{опасно}}^{TO} = \text{const} \cdot P(t) I \cdot \frac{N G F}{E_s^2}. \quad (2.12)$$

Потребность в измерении опасности обусловлена необходимостью выразить в числовой мере отношения между объектами, чтобы при определении отношений между ними оперировать не с самими объектами, а с соответствующими этим отношениям числовыми мера-

ми.

Основными проблемами анализа измерений являются проблемы представления и единственности. Проблема единственности состоит в определении всех возможных способов представления эмпирической системы различными числовыми системами и установления связи между ними и может быть сформулирована как проблема определения шкалы. Для оценивания и измерения опасности (безопасности) удобнее оперировать со шкалой отношений. К этому нас подводит концепция «приемлемого риска», пришедшая на смену концепции «абсолютной безопасности», а также нормативно-технические документы, задающие допустимые нормы воздействия опасных факторов. Исходя из этого, для показателя опасности целесообразно избрать шкалу измерения в диапазоне  $[0, 1]$ . Для масштабирования полученной ранее функции опасности нужно ввести нормированные значения определяющих факторов (допустимые или назначенные значения)

$$[P], [I], [N], [G], [F], [E_s]. \quad (2.13)$$

В этом случае безразмерная и нормированная функция опасности будет иметь вид

$$\bar{P}_{\text{опасно}}^{\text{ТО}} = \frac{P^{\text{реал}}}{[P]} \frac{I^{\text{реал}}}{[I]} \frac{N^{\text{реал}}}{[N]} \frac{G^{\text{реал}}}{[G]} \frac{F^{\text{реал}}}{[F]} \left( \frac{[E_s]}{E_s^{\text{реал}}} \right)^2. \quad (2.14)$$

Для выполнения условий безопасности очевидны соотношения:

$$\begin{aligned} P^{\text{реал}} &\leq [P]; \quad I^{\text{реал}} \leq [I]; \quad N^{\text{реал}} \leq [N]; \\ G^{\text{реал}} &\leq [G]; \quad F^{\text{реал}} \leq [F]; \quad [E] \leq E_s^{\text{реал}}. \end{aligned}$$

Далее, вводя для определяющих параметров безразмерные значения

$$\bar{P} = \frac{P^{\text{реал}}}{[P]}; \quad \bar{I} = \frac{I^{\text{реал}}}{[I]}; \quad \bar{N} = \frac{N^{\text{реал}}}{[N]};$$

$$\bar{G} = \frac{G^{\text{реал}}}{[G]}; \quad \bar{F} = \frac{F^{\text{реал}}}{[F]}; \quad \bar{E}_s = \frac{E_s^{\text{реал}}}{[E_s]},$$

можно записать выражение для функции опасности

$$\bar{P}_{\text{опасно}}^{\text{ТО}} = \bar{P} \bar{I} \cdot \frac{\bar{N} \bar{G} \bar{F}}{\bar{E}_s^2} \quad (2.15)$$

и соответствующую ей функцию безопасности

$$\bar{P}_{\text{безопасн}}^{\text{ТО}} = 1 - \bar{P} \bar{I} \cdot \frac{\bar{N} \bar{G} \bar{F}}{\bar{E}_s^2}. \quad (2.16)$$

Полученная таким образом модель показателя безопасности процессов функционирования НТО ТК и СК может быть записана в следующем виде:

$$\bar{P}_{\text{безопасн}}^{\text{ТО}} = 1 - \bar{P}_{\text{безоп}}^{\text{чел}} \cdot \bar{P}_{\text{безоп}}^{\text{техн}}, \quad (2.17)$$

где  $\bar{P}_{\text{безоп}}^{\text{чел}} = \bar{P} \bar{I}$  – безразмерный нормированный комплексный показатель, характеризующий возможность перехода от потенциальной к реальной (уже актуализированной) опасности процессов функционирования НТО ТК и СК, вызванной ошибками эксплуатации комплексов;

$\bar{P}_{\text{безоп}}^{\text{техн}} = \frac{\bar{N} \bar{G} \bar{F}}{\bar{E}_s^2}$  – безразмерный нормированный комплексный показатель, характеризующий потенциальную опасность процессов функционирования НТО ТК и СК, закладываемую при проектировании технологии и технических средств комплексов.

Полученное выражение для показателя безопасности может быть успешно использовано при формировании приборной компоненты КУБ. Так как оценивание уровня безопасности возможно по соотношению для энергетики опасных факторов

$$\overline{P}_{безоп}^{TO} = 1 - \frac{\text{const}}{\overline{E}_s^2},$$

следовательно, при заданных значениях  $[E_s]$  в целях оценивания уровня безопасности необходим расчет величин:  $E_s^{\text{мех}}$ ,  $E_s^{\text{тепл}}$ ,  $E_s^{\text{хим}}$ ,  $E_s^{\text{электр}}$ , т. е. для механических, тепловых, химических и электрических факторов опасности соответственно.

Учитывая особенности технологических процессов, протекающих в СК и ТК, можно записать соотношения для оценивания безопасности технологических процессов, получаемые на основе доступных средств измерения физических и химических величин, которые могут быть внедрены в существующую систему контроля технического состояния НТО ТК и СК.

Так, для оценивания химической компоненты безопасности можно получить выражение

$$\overline{P}_{безопасно}^{ТОхим} = 1 - \text{const} \left( \frac{\ln C}{\ln C - \ln n} \right)^2,$$

где  $C$  – концентрация опасных веществ,  $n$  – показатель кратности воздухообмена в системе вентиляции.

Для силового нагружения агрегатов и систем НТО ТК и СК показатель безопасности определяется как соотношение

$$\overline{P}_{безопасно}^{ТОмех} = 1 - \text{const} \left( \frac{\sigma_{\text{max}}^2}{\sigma_{\text{т}}^2} \right)^2,$$

где  $\sigma_T$  – предел текучести, а  $\sigma_{\max}$  – максимальные напряжения в элементах конструкционных материалов.

Для оценивания факторов теплового воздействия на НТО ТК и СК допустима оценка в виде соотношения

$$\overline{P}_{\text{безопасно}}^{T\text{Тепло}} = 1 - \text{const} \left( \frac{\Delta T_{\max}}{[\Delta T]} \right)^2,$$

где  $\Delta T$  – максимальные и предельно допустимые перепады температур на элементах НТО ТК и СК соответственно.

На основании этого же выражения можно получить следующие показатели электрической безопасности:

$$\overline{P}_{\text{безопасно}}^{T\text{Оэлектро}} = 1 - \text{const} \left( \frac{[R]}{R} \right)^2;$$

$$\overline{P}_{\text{безопасно}}^{T\text{Оэлектро}} = 1 - \text{const} \left( \frac{I}{[I]} \right)^4;$$

$$\overline{P}_{\text{безопасно}}^{T\text{Оэлектро}} = 1 - \text{const} \left( \frac{t}{[t]} \right)^2.$$

Здесь  $R$ ,  $I$  и  $t$  – электрические сопротивления, токи и время их воздействия.

Далее остановимся на описании показателя  $\overline{P}_{\text{безоп}}^{\text{чел}}$ . Описание логических условий перехода от потенциальной к реальной опасности процессов функционирования комплексов в процессе их эксплуатации представляется реализацией сложного события

$$\widehat{S}_{\text{чс}} = \widehat{S}_{\text{ос}} \cap \widehat{S}_{\text{вых}},$$

где  $\widehat{S}_{OC}$  – случайное событие возникновения опасной ситуации;

$\widehat{S}_{Вых}$  – случайное событие отсутствия выхода из опасной ситуации.

Необходимо отметить, что событие отсутствия выхода из опасной ситуации является инверсией события выхода из опасной ситуации.

Тогда показатель  $\overline{P}_{безоп}^{чел}$  представляется в виде:

$$\overline{P}_{безоп}^{чел} = \frac{P_{OC}(1 - P_{Вых})}{[P]},$$

где  $P_{OC} = p(\widehat{S}_{OC})$  – вероятность возникновения опасной ситуации (ОС) в процессе эксплуатации комплексов;

$P_{Вых} = p(\widehat{S}_{Вых} / \widehat{S}_{OC})$  – условная вероятность выхода из опасной ситуации;

$[P]$  – нормированное значение вероятности поражения объекта безопасности (обслуживающего персонала, оборудования НТО ТК и СК, а также РКН) в процессах эксплуатации.

В свою очередь логическое условие возникновения опасной ситуации представляется реализацией сложного события

$$\widehat{S}_{OC} = \widehat{S}_{НШмС} \cap \widehat{S}_{ОФ} \cap \widehat{S}_R \cap \widehat{S}_{защ},$$

где  $\widehat{S}_{НШмС}$  – случайное событие возникновения нештатной ситуации;

$\widehat{S}_{ОФ}$  – случайное событие возникновения опасного фактора при наличии нештатной ситуации;

$\hat{S}_R$  – случайное событие нахождения объекта безопасности в пространстве воздействия опасного фактора;

$\hat{S}_{Защ}$  – случайное событие отсутствия у объекта безопасности защищенности от воздействия опасного фактора,

а логическое условие выхода из опасной ситуации – реализацией сложного события

$$\hat{S}_{Вых} = \hat{S}_{Обн} \cap \hat{S}_{ПрР} \cap \hat{S}_{РР},$$

где  $\hat{S}_{Обн}$  – случайное событие обнаружения и распознавания опасной ситуации;

$\hat{S}_{ПрР}$  – случайное событие принятия решения по выходу из опасной ситуации;

$\hat{S}_{РР}$  – случайное событие реализации решения по выходу из опасной ситуации.

Необходимо отметить, что для реализации отдельных этапов выхода из опасных ситуаций необходимо наличие соответствующих средств.

С учетом данных логических условий показатель  $\bar{P}_{безоп}^{чел}$  преобразуется к виду:

$$\bar{P}_{безоп}^{чел} = \frac{P_{НШмС} P_{Оф} P_R P_{Защ} (1 - P_{Обн} P_{ПрР} P_{РР})}{[P]}, \quad (2.18)$$

где  $P_{НШмС} = p(\hat{S}_{НШмС})$  – вероятность возникновения нештатной ситуации в процессе эксплуатации;

$P_{Оф} = p(\hat{S}_{Оф} / S_{НШмС})$  – условная вероятность возникновения опасного фактора;

$P_R = p(\hat{S}_R / S_{HШмC} S_{ОФ})$  – условная вероятность нахождения объекта безопасности в пространстве воздействия опасного фактора;

$P_{Защ} = p(\hat{S}_{Защ} / S_{HШмC} S_{ОФ} S_R)$  – условная вероятность отсутствия у объекта безопасности защищенности от воздействия опасного фактора;

$P_{Обн} = p(\hat{S}_{Обн} / S_{HШмC})$  – условная вероятность обнаружения и распознавания опасной ситуации;

$P_{ПрР} = p(\hat{S}_{ПрР} / S_{HПлC} S_{Обн})$  – условная вероятность принятия правильного решения по выходу из ОС;

$P_{РР} = p(\hat{S}_{РР} / S_{HШмC} S_{Обн} S_{ПрР})$  – условная вероятность безотказной (безошибочной) реализации принятого решения.

Таким образом, показатель безопасности процессов эксплуатации имеет вид:

$$\bar{P}_{безоп} = 1 - \left( \frac{NG\bar{F}}{\bar{E}_s^2} \right) \left( \frac{P_{HПлC} P_{ОФ} P_R P_{Защ} (1 - P_{Обн} P_{ПрР} P_{РР})}{[P]} \right). \quad (2.19)$$

Соотношение (2.19) для оценки безопасности процессов функционирования НТО ТК и СК имеет объяснимый физический смысл, понятно лицам, осуществляющим оценку безопасности процессов эксплуатации, обладает стохастичностью, позволяет выявить основные направления обеспечения безопасности процессов функционирования комплексов по отношению к различным объектам безопасности как на этапе проектирования, так и на этапе эксплуатации.

Необходимо заметить, что значения показателя  $\bar{P}_{безопасно}$  должны определяться для каждой из ранее сформированных групп объектов безопасности, т. е. для обслуживающего персонала, НТО ТК и СК, а также для



РКН. При этом интегральный показатель безопасности  $\overline{P}_{\text{безопасно}\langle 3 \rangle}$  будет рассматриваться как вектор показателей безопасности процессов функционирования НТО ТК и СК для различных объектов безопасности

$$\overline{P}_{\text{безопасно}\langle 3 \rangle} = \left\langle \overline{P}_{\text{безопасно}}^{\text{персонал}}, \overline{P}_{\text{безопасно}}^{\text{ТО}}, \overline{P}_{\text{безопасно}}^{\text{РКН}} \right\rangle. (2.20)$$

Применение данного показателя позволяет полнее учесть особенности свойства безопасности процессов функционирования НТО, т. е. способность не наносить ущерб больше допустимой величины обслуживаемому персоналу, технологическому оборудованию и РКН. Это означает, что оценивание безопасности процессов функционирования НТО может быть выполнено по классической бинарной схеме и сводится к реализации критерия оценивания вида:

$$G : \overline{P}_{\text{безопасно}\langle 3 \rangle} \in \overline{P}_{\text{безопасно}\langle 3 \rangle}^{\partial} \Leftrightarrow G : \begin{cases} \overline{P}_{\text{безопасно}}^{\text{персонал}} > \overline{P}_{\text{безопасно}}^{\text{персонал}\partial} \\ \overline{P}_{\text{безопасно}}^{\text{ТО}} > \overline{P}_{\text{безопасно}}^{\text{ТО}\partial} \\ \overline{P}_{\text{безопасно}}^{\text{РКН}} > \overline{P}_{\text{безопасно}}^{\text{РКН}\partial} \end{cases}. (2.21)$$

Важным компонентом безопасности является качество выполнения проектных работ по созданию НТО ТК и СК. Несомненно, что низкое качество проектных работ может стать постоянным источником опасности в процессе эксплуатации НТО ТК и СК. Поэтому желательно ввести в показатель безопасности показатель качества проектирования НТО ТК и СК и оценить его влияние на общую безопасность комплексов.

Для получения выражения показателя проектной эффективности НТО ТК и СК используем алгоритм, описанный ранее (п. 2.3).

Такой алгоритм позволяет выявить определяющие параметры в списке требований, предъявляемых к НТО ТК и СК. К ним относятся:

из требований по назначению:

- вес (масса) РКН ( $m_{РКН}$ ),
- габариты РКН ( $D_{РКН}$ );
- оперативность (временные параметры) ( $t$ );

из требований по другим свойствам:

- стоимость (стоимостные показатели комплекса) ( $C$ );
- все виды работ ( $A$ ), выполнение которых необходимо для достижения поставленной перед НТО ТК и СК цели.

Величина результата действия НТО ТК и СК, которая является функцией определяющих параметров, строго получена на основании имеющегося тезауруса и набора исходных данных по назначенным свойствам СК и ТК:

$$Y=f(t, m_{РКН}, D_{РКН}, A, C).$$

Нетрудно видеть, что для полученного набора определяющих параметров

$$t, m_{РКН}, D_{РКН}, A, C$$

единицы измерения следующие ( $n=5$ ):

$$[t]=с, [m_{ка}]=кг, [H]=м, [A]=дж, [C]=руб.$$

Независимыми для этого набора единицами являются ( $k=4$ ):

$$[с], [кг], [м], [руб].$$

Следовательно, мы имеем дело со случаем ( $n > k$ ), при котором структура искомой зависимости определяется по правилу

$$Y=f(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_n).$$

Корреляцию таких параметров, как энергетические и стоимостные, мы обсуждали в п. 2.2, что дает возможность записать выражение

$$C = \text{const } A,$$

которое при использовании анализа размерностей приводит к выражению

$$Y = \text{const} \frac{m_{PKH} D_{PKH}^2}{t^2 A}.$$

То обстоятельство, что временной параметр ( $t$ ) в полученном выражении для комплекса имеет две взаимно противоположные по влиянию составляющие: оперативность применения ( $t$ ) и назначенный ресурс ( $R$ ), позволяет переписать полученное соотношение без изменения правил его составления. Таким образом, окончательно получим

$$Y = \text{const} \frac{m_{PKH} \cdot R \cdot D_{PKH}^2}{t^3 \cdot A}.$$

Для этого выражения стоимостные показатели свернуты в отношении  $\text{const}/A$ .

Следовательно, функции требуемого и реального результатов для НТО ТК и СК имеют вид

$$Y_{mp} = \text{const} \frac{m_{PKH mp} R_{mp} (D_{PKH}^2)_{mp}}{t_{mp}^3 A_{mp}};$$

$$Y = \text{const} \frac{m_{PKH} \cdot R \cdot D_{PKH}^2}{t^3 \cdot A}$$

и нулевую размерность.

В соответствии с полученными для показателя эффективности НТО свойствами и при соблюдении очевидного соотношения

$$Y_{реал} < Y_{mp}$$

выражение для показателя эффективности удобнее представлять со шкалой  $0 \div 1$ , тогда

$$\overline{\Pi}_{эф}^{TO} = \frac{Y_{реал}}{Y_{mp}}$$

и, следовательно,

$$\overline{\Pi}_{эф}^{TO} = \overline{m_{PKH}} \left( \overline{D_{PKH}^2} \right) \frac{\overline{R}}{\overline{t^3}} \frac{1}{\overline{A}}, \quad (2.22)$$

где

$$\overline{m_{PKH}} = \frac{m_{PKH}}{m_{PKH}^{mp}}; \quad \overline{t} = \frac{t}{t_{mp}}; \quad \overline{A} = \frac{A}{A_{mp}}; \quad \overline{D_{PKH}} = \frac{D_{PKH}}{D_{PKH}^{mp}}; \quad \overline{R} = \frac{R}{R_{mp}}.$$

Так как  $t$ ,  $m_{PKH}$ ,  $D_{PKH}$  и  $R$  – целевые показатели, единственным варьируемым параметром является работа ( $A$ ) или энергия, расходуемая на достижение цели.

Полученное выражение (2.22) обладает рядом полезных свойств.

Это выражение позволяет оценивать эффективность НТО ТК и СК в целом, вместе с тем оно успешно справляется с задачей оценивания эффективности отдельно взятых объектов комплексов.

Для НТО ТК и СК целевые параметры остаются постоянными:

$$\overline{m_{PKH}} \left( \overline{D_{PKH}^2} \right) \frac{\overline{R}}{\overline{t^3}} = 1,$$

тогда для них показатель эффективности приобретает вид энергетического КПД:

$$\overline{\Pi}_{эф}^{TO} = \frac{A_{mp}}{A} = \frac{E_{mp}}{E}.$$

Так для агрегатов перемещения получается удобное соотношение, составленное как отношение энергий на перемещение на расстояние  $S$  РКН и агрегата технологического оборудования массой  $M_{TO}$ :

$$\overline{\Pi}_{эф}^{транспорт} = \frac{E_{mp}}{E} = \frac{m_{ркн} gS}{M_{TO} gS + m_{ркн} gS} = \frac{m_{ркн}}{M_{TO} + m_{ркн}},$$

которое характеризует массовое совершенство рассматриваемого агрегата.

Для оценивания эффективности реализации технологических процессов, имеющих назначенные временные ограничения (длительность работы систем охлаждения определяется длительностью пуска РКН), используется соотношение мощностей

$$\overline{\Pi}_{эф}^{TO} = \frac{N_{mp}}{N_{реал}}. \quad (2.23)$$

Полученный подход позволяет оценивать практически все имеющиеся в КРК виды технологического оборудования, используя соответствующие выражения для расчета энергоемкости.

Для оценивания гидравлических машин  $E = QPt$ , где  $Q$  – расход,  $P$  – давление,  $t$  – время. Для оценивания электрических машин  $E = JU t$ , где  $J$  – величина тока,  $U$  – величина напряжения.

Используя выражение (2.23) для показателя целевой (проектной) эффективности НТО ТК и СК, можно видеть, что

$$\overline{\Pi}_{эф}^{TO} = \frac{N_{mp}}{N_{реал}} = \frac{N_{mp}}{N_{mp} - N_{дон}}.$$

Это выражение позволяет вычислить дополнительную мощность, выделяемую при функционировании НТО ТК и СК. Эта мощность не расходуется на достижение назначенных для НТО целей, а следовательно, представляет собой источник опасности. Ее появление связано с несовершенством технических решений при проектировании. Простым примером для нее является мощность сил трения, избежать которых практически не удастся. В то же время трение является причиной износа, повышения температурного режима работы агрегатов НТО и т. д.

Эта мощность в выражении (2.19) для показателя безопасности обозначена как  $N$ .

Тогда в показатель безопасности можно ввести показатель целевой эффективности НТО ТК и СК и, используя соотношение

$$N = N_{mp} \left( \frac{1 - \overline{P}_{эф}^{TO}}{\overline{P}_{эф}^{TO}} \right),$$

с учетом масштабирования удается для показателя эффективности окончательно записать

$$\begin{aligned} \overline{P}_{безоп}^{TO} = 1 - & \left( \frac{\overline{GF}}{\overline{E}_s^2} \cdot \frac{N_{mp}}{[N]} \cdot \frac{1 - \overline{P}_{эф}^{TO}}{\overline{P}_{эф}^{TO}} \right) * \\ & * \left( \frac{P_{НПЛС} P_{ОФ} P_R P_{Защ}}{[P]} (1 - P_{Обн} P_{ПрР} P_{РР}) \right). \end{aligned} \quad (2.24)$$

Полученное соотношение удовлетворяет всем перечисленным выше условиям и отражает необходимые для оценивания безопасности комплекса аспекты. Это выражение формально связывает определяющие параметры, показывая их влияние на общую безопасность

НТО ТК и СК, а также позволяет увидеть принципиальные пути ее повышения.

Полученное соотношение для оценивания безопасности НТО ТК и СК имеет объяснимый физический смысл и позволяет выявить основные направления в повышении уровня безопасности комплексов.

Из полученного соотношения видно, что для повышения (достижения заданного уровня) безопасности функционирования НТО ТК и СК надлежит выполнять следующие рекомендации.

1. Обеспечивать минимально допустимый уровень вероятности возникновения аварийной ситуации.

2. Минимизировать возможность возникновения информационных ошибок управления, оповещения и предупреждения.

3. Обеспечивать максимально высокую степень защищенности (стойкости) технологического оборудования НТО ТК и СК. Это особенно важно, поскольку, во-первых, показатель для стойкости в два раза выше остальных показателей, во-вторых, агрегаты НТО существующих комплексов имеют практически незначительную защищенность.

Для обеспечения безопасности наиважнейшим параметром является показатель целевой эффективности функционирования НТО ТК и СК ( $\overline{P}_{эф}^{TO}$ ).

Об этом свидетельствует характер зависимости  $\overline{P}_{безоп}^{TO} = f(\overline{P}_{эф}^{TO})$ , показанной на рис. 2.8.

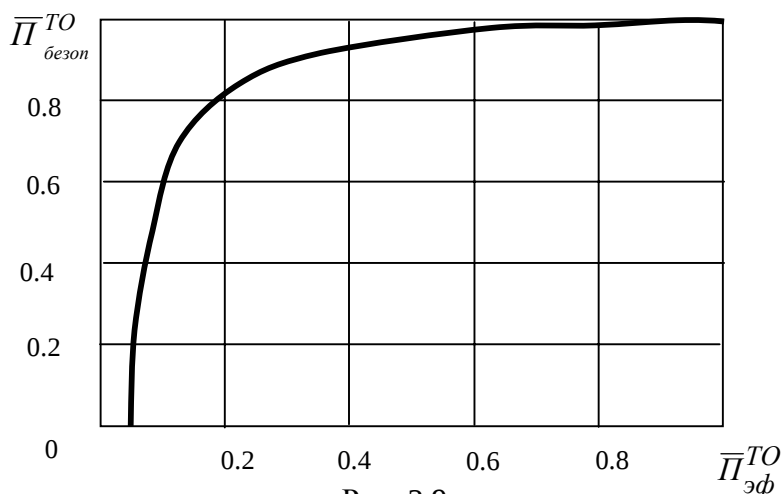


Рис. 2.9.

Объективная невозможность достичь требуемой безопасности применения НТО ТК и СК неизбежно порождает создание дополнительных средств обеспечения безопасности. Такие средства первоначально составляли общетехнические средства безопасности, но в процессе эволюции КРК стали специальными средствами НТО, предназначенными для обеспечения безопасности. Так же как и для целевых средств технологического оборудования, они должны быть оценены по эффективности их применения, но, естественно, с другим показателем эффективности.

Полученное выражение для показателя безопасности позволяет определить выражение для показателя эффективности работы специальных технологических средств обеспечения безопасности СК и ТК

$$\overline{P}_{эф}^{COB} = \|C, R, t\|,$$



включающее в себя показатели цели –  $C$ , показатели потребляемого ресурса –  $R$ , показатели времени реализации цели –  $t$ .

Выявленный показатель безопасности НТО ТК и СК естественно считать целевым показателем для специальных технологических средств обеспечения безопасности СК и ТК. Следовательно, для специальных технологических средств обеспечения безопасности

$$C = \overline{P}_{безоп}^{TO}.$$

Ресурсные показатели для средств обеспечения безопасности НТО ТК и СК в самом общем виде выражаются через стоимостные и энергетические параметры, потребляемые рассматриваемой системой:

$$R = || C, E ||.$$

Как было показано ранее, стоимостные и энергетические ресурсные показатели имеют корреляцию, позволяющую на этапе формирования облика КУБ свернуть их до одного показателя ( $E$ ). Временные показатели  $t$  ("бесплатный ресурс" системы) могут иметь градацию по временам предотвращения, локализации или ликвидации последствий аварийных ситуаций.

Логично предположить, что результат работы специальных средств обеспечения безопасности будет тем выше, чем выше будет достигнутое значение показателя безопасности, чем выше будет обеспечение этих средств энергетическими ресурсами и чем быстрее такие средства достигнут своей цели. Таким образом, можно записать функции (требуемого и реального) результата для оценивания эффективности специальных технологических средств обеспечения безопасности СК и ТК в виде функции требуемого результата

$$Y_{COB}^{mp} = const \cdot \left( \overline{\Pi}_{безоп}^{TO} \right)^{mp} \frac{E_{COB}^{mp}}{t_{COB}^{mp}}$$

и функции реального результата

$$Y_{COB}^{реал} = const \cdot \left( \overline{\Pi}_{безоп}^{TO} \right)^{реал} \frac{E_{COB}^{реал}}{t_{COB}^{реал}}.$$

Тогда выражение для показателя эффективности специальных технологических средств обеспечения безопасности СК и ТК примет вид

$$\overline{\Pi}_{эф}^{COB} = \frac{\left( \overline{\Pi}_{безоп}^{TO} \right)^{mp}}{\left( \overline{\Pi}_{безоп}^{TO} \right)^{реал}} \cdot \frac{E_{COB}^{mp}}{E_{COB}^{реал}} \cdot \frac{t_{COB}^{реал}}{t_{COB}^{mp}}. \quad (2.25)$$

Естественно предположить, что специальные средства обеспечения безопасности создаются для того, чтобы выполнить их целевое предназначение

$$\frac{\left( \overline{\Pi}_{безоп}^{TO} \right)^{mp}}{\left( \overline{\Pi}_{безоп}^{TO} \right)^{реал}} = 1$$

и обеспечить назначенную оперативность работы

$$\frac{t_{COB}^{реал}}{t_{COB}^{mp}} = 1,$$

откуда следует, что

$$\overline{\Pi}_{эф}^{COB} = \frac{E_{COB}^{mp}}{E_{COB}^{реал}}. \quad (2.26)$$

Таким образом, для обеспечения заданного уровня эффективности функционирования специальных средств обеспечения безопасности НТО ТК и СК следует обращать внимание на рациональность расходования энергетических ресурсов этих средств для достижения назначенного уровня безопасности.

Полученное выражение для показателя эффективности специальных средств обеспечения безопасности может быть совмещено с общим и техническим показателем безопасности.

Допустимое значение потока мощности  $[N]$  на объекты НТО ТК и СК можно представить в виде суммы двух потоков: потока мощности, поглощаемого исследуемым объектом  $N_s$ , и потока мощности, поглощаемого специальными средствами безопасности этих объектов  $N_s^{\text{COB}}$ :

$$[N] = N_s + N_s^{\text{COB}},$$

откуда, переходя к показателям энергии, можно записать

$$[N] = E_s / t_s + E_s^{\text{COB}} / t_s.$$

Тогда показатель безопасности представляется в виде

$$\overline{P}_{\text{безопасно}}^{\text{тех}} = 1 - \overline{G} \cdot N_{\text{mp}} \frac{\overline{F}}{\overline{E}_s^2} \cdot \frac{t_s}{t_{\text{mp}}} \cdot \left( \frac{1 - \overline{P}_{\text{эф}}^{\text{TO}}}{\overline{P}_{\text{эф}}^{\text{TO}}} \right) \cdot \frac{E_{\text{mp}}^u}{E_s + E_s^{\text{COB}}}.$$

Далее, используя соотношение, введенное для оценивания показателя эффективности специальных средств обеспечения безопасности, можно записать

$$E_s^{COB} = \frac{[E_s]^{COB}}{\overline{\Pi}_{эф}^{COB}};$$

$$[E_s]^{COB} = E_{доп}^ц = E_{тр}^ц \frac{1 - \overline{\Pi}_{эф}^{TO}}{\overline{\Pi}_{эф}^{TO}},$$

откуда после преобразований получим

$$\overline{\Pi}_{безопасно}^{tex} = 1 - \overline{G} \cdot N_{тр} \frac{\overline{F}}{\overline{E}_s^2} \cdot \bar{t} \cdot \frac{1}{\frac{E_s}{E_{тр}^ц} + \frac{1 - \overline{\Pi}_{эф}^{TO}}{\overline{\Pi}_{эф}^{TO}} \cdot \frac{1}{\overline{\Pi}_{эф}^{COB}}},$$

где  $\bar{t} = \frac{t_s}{t_{тр}}$  – показатель оперативности

$$(t_s = t_{тр} + t_{инерц}).$$

Анализ изменения полученного выражения для показателя безопасности, преобразованного так, чтобы его аргументом стал показатель эффективности рассматриваемого средства обеспечения безопасности процессов функционирования ( $\overline{\Pi}_{эф}^{COB}$ ), показал, что при заданном уровне  $\overline{\Pi}_{эф}^{TO}$  технологического совершенства НТО ТК и СК показатель безопасности тем выше, чем меньше эффективность специальных средств обеспечения безопасности. Этот результат имеет как минимум два объяснения:

Во-первых, излишек энергии, направленной на диссипацию действия опасного фактора, снижает значение показателя эффективности специальных средств

обеспечения безопасности ( $\overline{P}_{эф}^{COB}$ ), но повышает уровень безопасности НТО ТК и СК. По этой причине энергоемкость существующих средств обеспечения безопасности НТО ТК и СК становится соизмеримой с энергоемкостью технологического оборудования СК и ТК.

Во-вторых, наиболее результативным фактором в обеспечении безопасности НТО ТК и СК является повышение эффективности ( $\overline{P}_{эф}^{TO}$ ) выполнения технологических процессов подготовки и пуска РКН, а не увеличение усилий по созданию средств обеспечения безопасности, к тому же не всегда эффективных.

Материалы, представленные в настоящем разделе монографии, позволяют сделать следующие выводы:

1. Анализ источников опасности, сопровождающих технологические процессы в НТО ТК и СК, направленные на подготовку и пуск РКН, описываются открытым множеством, мощность которого постоянно растет. Однако агрегирование таких источников позволяет выделить среди них два фактора, которыми являются:

во-первых, технический фактор, связанный с качеством проектирования, изготовления и монтажа НТО ТК и СК, а также с процессами естественной деградации этого оборудования, находящегося к тому же за границами назначенных показателей ресурса;

во-вторых, фактор, связанный с качеством работы обслуживающего персонала. Этот фактор включает в себя как объективные психофизические и образовательные аспекты, так и субъективные социально-экономические обстоятельства.

2. Аналитические исследования, основанные на положениях теории систем в области описания общих свойств систем управления, выполненные в интересах общей проблемы работы, показывают, что КУБ должен быть способен измерять и оценивать безопасность процессов подготовки и проведения пусков РКН по множеству специальных и взаимосвязанных показателей, которыми являются:

- показатель безопасности НТО ТК и СК, имеющий две составляющие: техническую и связанную с человеческим фактором;
- показатель эффективности работы НТО ТК и СК;
- показатель эффективности работы специальных технических средств обеспечения безопасности НТО ТК и СК;
- показатель работоспособности НТО ТК и СК, характеризующий текущее состояние НТО ТК и СК, находящегося в процессе длительной эксплуатации.

3. Оценивание КУБ как сложной и большой системы, формирующейся на основе единой системной концепции, должно выполняться с единых позиций и иметь единый алгоритм. Основное содержание такого алгоритма составляет морфологический анализ свойств и требований, имеющихся в науке и технике по вопросам сложных систем управления, результаты которого на основе анализа размерностей свертываются до необходимых показателей, имеющих единую масштабность и не имеющих нулевую размерность.

4. Семантический анализ основных понятий, связанных с КУБ, позволяет предложить такие понятия, как:

- безопасность процесса функционирования НТО ТК и СК;
  - безопасное функционирование НТО ТК и СК;
  - критический ущерб;
  - источник опасности процессов функционирования НТО ТК и СК;
  - причина возникновения опасной ситуации,
- использование которых обеспечивает выполнение процедуры формализации этих понятий до уровня математического описания.

5. Использование разработанного подхода к формированию системы показателей КУБ с единых позиций позволило выявить функциональные взаимосвязи этих показателей с безопасностью процессов функционирования СК и ТК, а также определить технические предпочтения в достижении максимальной безопасности процессов функционирования НТО ТК и СК, к которым относится доминирующее влияние на безопасность процессов функционирования НТО ТК и СК качества проектных работ по созданию наземной части КРК.

### **III. МЕТОДЫ ИНФОРМАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ И СТАРТОВЫХ КОМПЛЕКСОВ**

#### **3.1. Особенности информационно-технического обеспечения процессов безопасности функционирования технологического оборудования технических и стартовых комплексов**

Успешная реализация КУБ тесно связана с тем, насколько полно комплекс обеспечен необходимой и своевременной информацией о действующих факторах опасности, так как недостаток информации может привести к принятию неправильных решений. Однако и избыток информации или ее излишняя детализация может перегружать КУБ, снижать качество решения проблем, которые возложены на этот комплекс. Поэтому для КУБ важно выявить необходимый объем и характер информации. Учет информационных факторов позволяет качественно и количественно обосновать выбранный вариант распределения полномочий и ответственности между компонентами КУБ, установить необходимые взаимозависимости между совершенствованием организационно-технической структуры и рационализацией документооборота, выявить возможности и пути создания интегрированных систем обработки данных.

Между системой информации и структурой управления безопасностью имеется взаимосвязь и взаимозависимость. Объем, характер и объективные потоки информации определяют состав и взаимодействие компонент КУБ. Излишняя и неопределенная информация вызывает усложнение структуры КУБ, увеличение



трудовых затрат управленческого персонала. Нечетко организованные, замедленные потоки информации ведут к дублированию функций комплекса, к снижению ответственности руководителей и исполнителей, к нарушению ритма функционирования КУБ.

Наряду с этим, многозвенность в структуре управления КУБ, чрезмерное дробление элементов КУБ, нечеткая координация и связь между ними не позволяют наладить эффективную, гибкую, динамичную систему информации в КУБ. Управленческая иерархия может рассматриваться как структура центров принятия решений по обеспечению безопасности, из которых директивная, распорядительная информация передается на уровни исполнения решений и к которым от исполнительного уровня идет встречный поток информации. Объем информации, проходящей в КУБ, тесно связан со степенью централизации процессов принятия решений. В многоуровневой системе решения, которые принимаются на уровне управления КРК, затрагивают больше коммуникационных центров, чем те, которые принимаются на низших уровнях комплекса. Слишком сильная централизация может перегрузить и, как правило, перегружает систему и создает заторы в потоках информации. Эта проблема становится более острой по мере роста управленческой вертикали и может значительно снизить скорость принятия решения, а также адаптацию КРК к меняющимся условиям функционирования НТО ТК и СК. К тому же при прохождении информации через множество административно-управленческих звеньев КРК нередко происходит ее искажение.

Информационная система по обеспечению процессов функционирования НТО ТК и СК, сложившаяся на сегодня, представляется в виде укрупненной схемы

(рис. 3.1), которая позволяет сделать следующие выводы:

1. Потоки информации в системе управления безопасностью СК и ТК являются более сложными и разветвленными, чем материальные и энергетические потоки, связанные с непосредственным технологическим процессом подготовки и пуска РКН.

2. Ни одна из функций управления (планирование, организация, распоряжение, координация, связь, контроль) не может обеспечить поддержание заданных параметров безопасности всего КРК без наложения постоянной прямой и обратной связи потоков информации.

3. Информационная система безопасности НТО ТК и СК представляет собой неотъемлемую органическую часть АСУ ПП, обеспечивающую комплектность, эффективность взаимодействия и взаимосвязь всех звеньев КРК.

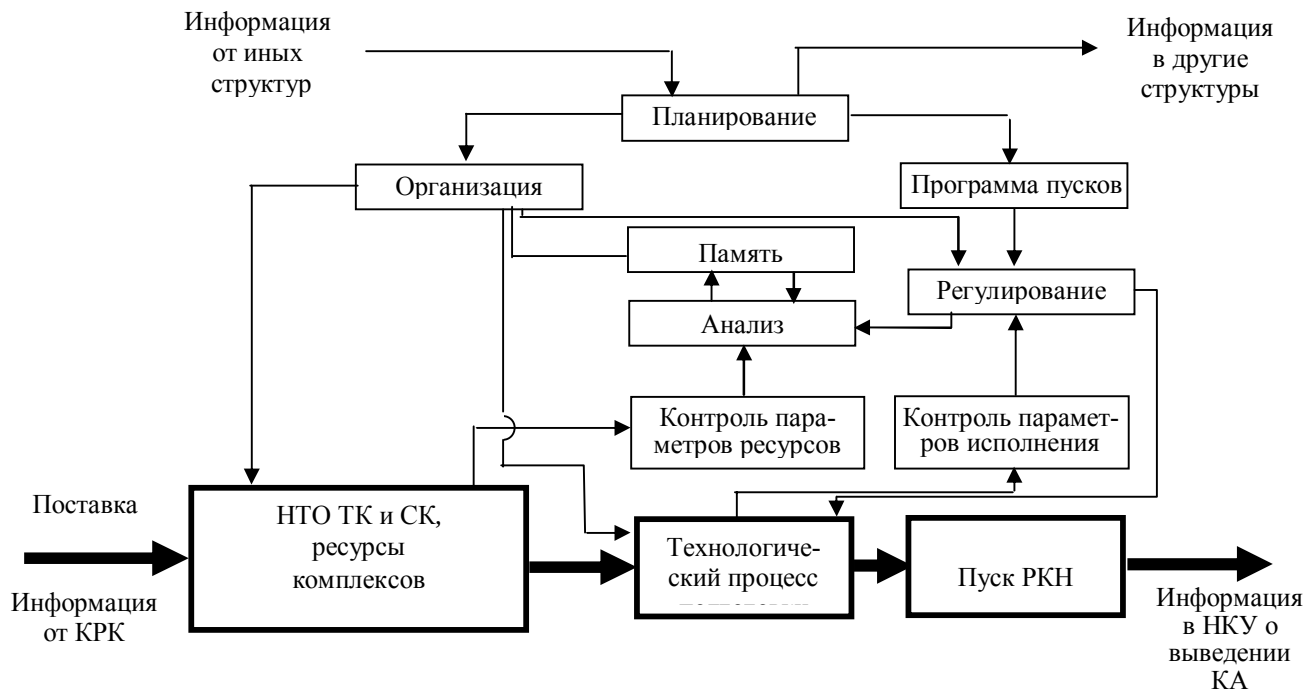


Рис. 3.1 Информационная система НТО ТК и СК

Если сопоставить информационные потоки, объективно вызываемые процессом нормального функционирования тех или иных систем управления, с фактическим состоянием, сложившимся в структурах управления КРК, то во многих случаях можно установить следующие отрицательные явления:

- Параллельность прохождения одинаковой информации. Одни и те же данные и показатели поступают в разные структурные подразделения КРК и обрабатываются ими, а иногда даже и различными частями одного структурного подразделения. Связь между службами по систематическому обмену плановой, отчетной и аналитической информацией не всегда упорядочена.

- Отсутствие единства при формировании информации. Каждое подразделение использует свои плановые показатели, нормативно-справочные данные, формы документов, маршрутов их движения.

- Неупорядоченность и нерегулярность информационных потоков. Так анализ деятельности КРК по производству пусков РКН, а также других мелкосерийных производств в машиностроении [91] показал, что неупорядоченность и нерегулярность информационных потоков достигает высокой степени. Из всех находящихся в обороте форм документации только 27 % имеют регламентированную периодичность, причем по ряду видов деятельности эта величина оказывается еще меньше (технологическая подготовка производства – 16 %, оперативное производственное планирование – 23 %). Документы, имеющие произвольную форму, составляют 28 % общего числа, а в ряде случаев их удельный вес достигает больших значений (технологическая подготовка производства – 30 %, контроль качества продукции – 45 %).

- Повторяемость информации. Нередко одни и те же массивы информации представляются в вышестоящие органы неоднократно (ежесуточно, ежедневно, ежемесячно, ежеквартально). По существу, это во многом последовательно повторяющиеся потоки информации.

- Запаздывание информации. Скорость обработки информации ручным способом настолько отстает от ритма производственного процесса в КРК, что зачастую эта информация не может быть использована для управления. Недостаточная оперативность при сборе и обработке информации затрудняет принятие решений по отклонениям в процессе производства пусков РКН. Это снижает эффективность управленческой деятельности. Между тем общее время на передачу, обработку информации и принятие решения в любом случае должно быть меньше, чем время, в течение которого могут произойти необратимые процессы на НТО ТК и СК. Из-за отсутствия систематизированной учетной информации, ограниченности оперативного анализа показателей работы технологического оборудования СК и ТК невозможно производить в приемлемые сроки многовариантные расчеты, связанные с принятием управленческих решений по достижению безопасных состояний НТО ТК и СК. Одновариантные решения отражают лишь некоторый фиксированный уровень использования ресурсов.

- Недостаточная надежность и полнота информации. Во многих случаях отсутствие единых требований и условий сбора информации, а также регулярного, хорошо организованного учета и отчетности приводит к получению случайных данных, не отражающих реального положения дел. Из-за перегруженности работников вычислительными работами допускаются ошибки в рас-

четах, а затем и в принимаемых решениях. На их выявление и исправление требуются дополнительные усилия и время.

- Излишний объем информации. Излишнее количество планово-учетной и технической информации часто является следствием неупорядоченности данных. В результате квалифицированные специалисты отвлекаются на поиск и обработку данных, показателей и документов, которые не всегда вызваны производственной необходимостью. Большой объем документов, циркулирующих внутри проектной и эксплуатационной организаций, часто свидетельствует о недостаточно четком разграничении функций и ответственности за их выполнение. Все это порождает волокиту, вызывает излишние затраты труда управленческого персонала и увеличивает время, необходимое для принятия решений.

- Несопоставимость информации. Различные периоды получения и обработки данных в различных подразделениях предприятия часто не позволяют провести достоверный сопоставимый анализ требуемых и реальных показателей. Из-за трудоемкого пересчета большого числа взаимосвязанных показателей зачастую не обеспечивается соответствие между планируемыми затратами на подготовку и пуск РКН и намеченной программой пусков.

Практические нужды КРК в настоящее время вызывают необходимость в создании интегрированных информационных систем в виде КУБ, приспособленных не к структуре установившихся взаимосвязей и подчинения, а к процессу комплексного решения проблем обеспечения безопасности НТО ТК и СК. При таком подходе КУБ не будет относиться только к компетенции одного подразделения, а будет оказывать разностороннее воздействие на КРК в целом, нарушая традиционно

сложившуюся структуру, стирая грани между функциональным и линейным руководством. В этих условиях на первый план выдвигается определение относительной важности различных центров принятия решений в КРК и необходимой в каждом случае информации, а также установление каналов ее получения.

Интегрированные информационные системы в виде КУБ ориентированы на использование одних и тех же исходных показателей для решения широкого круга прогностических, плановых, оперативно-производственных, коммерческих, учетных и других задач.

Основной упор в этих системах делается не на разделение информации по обособленным функциям между структурными подразделениями, а на взаимосвязку и интеграцию деятельности всех элементов организационной системы КРК. Основой интеграции НТО ТК и СК в единую систему служат информационные сети и потоки.

Создание интегрированных информационных систем в виде КУБ предполагает:

- создание единой, централизованной в масштабе КРК нормативно-справочной системы;
- построение схемы документооборота с учетом прохождения информации через единый центр обработки данных;
- повышение точности и оперативности учета с одновременным сокращением до необходимого уровня количества документов и показателей;
- четкую регламентацию процедур хранения информации и выдачи ее на различные уровни управления, а также доступа к ней заинтересованных подразделений.

Взаимосвязь построения интегрированной информационной системы в виде КУБ с организационной структурой управления КРК проявляется в том, что при определении уровней, которым следует передать право принятия решений по вопросам обеспечения безопасности, целесообразно исходить из того, на каком уровне существуют лучшие условия для получения информации, необходимой для принятия оптимального решения. Информацию можно получать на всех структурных уровнях наземных комплексов КРК. Однако при решении вопроса о том, какому из них дать право решения на управление безопасностью, следует выявить тот уровень, который располагает своевременной и наиболее достоверной информацией.

Для рационализации информационных потоков необходимо производить их тщательный анализ с целью выявления объемов и видов информации, проходящей по всем каналам связи, имеющимся на наземном комплексе КРК. Поскольку управленческая деятельность любого подразделения наземного комплекса находит выражение в создании различных форм документов и показателей, а также в оперировании ими, при анализе потоков информации необходимо охватывать функции всех подразделений, их взаимодействие, номенклатуру поступающих, разрабатываемых и выходных документов, определять процессы их формирования и маршруты движения, периодичность составления и т. д. Центральное место в анализе безопасности НТО ТК и СК занимает определение данных, сведений и показателей, объективно необходимых каждому подразделению комплекса для выполнения своих функций.

Как было показано в разделе 3 (п.3.2), среди таких показателей важное место занимает показатель работо-



способности технологического оборудования наземного комплекса КРК.

Из определения надежности как свойства объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования, следует, что это свойство сложное (составное) (рис. 3.2), а из определений его простых свойств следует, что надежность определяется на основании работоспособности.

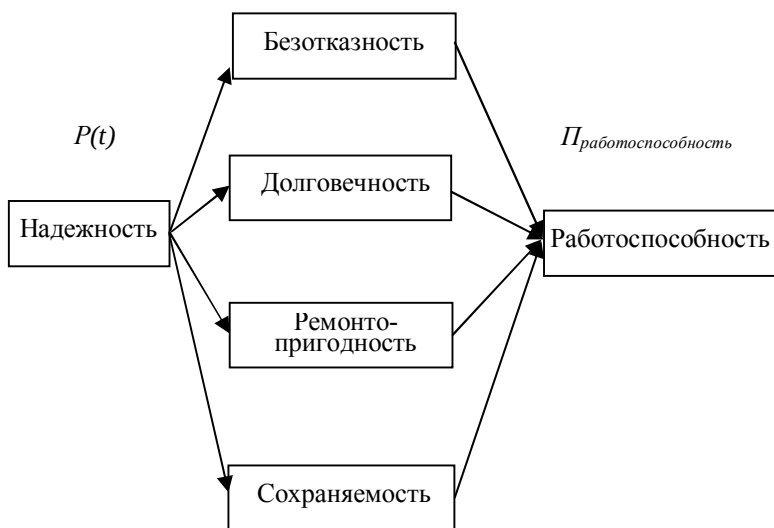


Рис. 3.2.

Как видно из определений свойств, работоспособность и надежность – суть вещи, характеризующие текущее состояние объекта в смысле возможности выполнения заданных функций. Работоспособность включает в себя не только технический аспект описания техники, но и человеческий фактор предыстории эксплуатации. Очевидно, что со временем работоспособность техники снижается, что проявляется в отказах. Поскольку отказы являются одним из источников опасных ситуаций, то оценивание работоспособности для КУБ необходимо.

Снижение работоспособности при длительной эксплуатации НТО ТК и СК, которое может быть спрогнозировано и исследовано еще при проектировании, связано с физико-химическими процессами естественного «старения» конструкционных материалов и износа деталей под воздействием рабочих нагрузок. Однако помимо этого при эксплуатации имеют место непрогнозируемые процессы деструктивных изменений, обусловленных появлением нерасчетных нагрузок из-за отказов, накопления повреждений и ошибок персонала при выполнении эксплуатационных операций (управлении процессом функционирования, проведении технического обслуживания, ремонтно-восстановительных работ и пр.).

Ярко выраженной особенностью объектов НТО ТК и СК в отличие от информационно-управляющих систем, для которых весьма развиты научные основы функционального контроля и технической диагностики, является то, что наступление предельного состояния какого-либо элемента агрегата или системы НТО ведет к нерасчетным условиям эксплуатации и появлению опасной ситуации. Такие явления и изменения технического состояния для объектов НТО ТК и СК настолько разнообразны по видам и местам проявлений и столь

индивидуальны, что их практически невозможно не только прогнозировать, но и контролировать без специальных технических средств и организационно-методических мероприятий, объединяемых в системы функционального мониторинга технического состояния СК и ТК.

Отсюда следует, что управление безопасностью НТО ТК и СК через оценивание технического состояния НТО должно производиться не после исчерпания назначенного ресурса, а в течение всего жизненного цикла СК и ТК, т.е. начинаться с разработки концепции создания СК и ТК и формулировки требований к техническим и организационно-методическим средствам контроля технического состояния и продолжаться при обосновании физических принципов функционирования и технологий подготовки РКН к пуску и контролю технического состояния, при проектировании оборудования и средств контроля, при обосновании организационно-технической структуры систем эксплуатации ТК, СК и КУБ.

Сегодняшняя стратегия эксплуатации НТО ТК и СК по техническому состоянию основана на введении ключевого звена, которым является мониторинг технического состояния. Реализация этого подхода, с одной стороны, показала его действенность, а с другой – выявила ограничения и проблемы.

Ограничения связаны с тем, что при проектировании агрегатов и систем не рассматривались вопросы продления сроков эксплуатации, а следовательно, не были предусмотрены соответствующие технические и организационные средства. Сейчас практически невозможно изменить конструкцию эксплуатируемых агрегатов и систем, поэтому используются только внешние сред-

ства мониторинга, что не позволяет охватить желаемый спектр измерений.

Одной из задач мониторинга является обоснование объема и вида информации для адекватного оценивания технического состояния объектов наземного комплекса КРК. В наибольшей степени это касается уникального оборудования НТО ТК и СК. Для него использование хорошо разработанных и апробированных вероятностных методов оценки состояния ограничено. Для этого оборудования необходимо использовать индивидуальный подход к оцениванию технического состояния на основе проникновения в физику процессов старения элементов и материалов.

### **3.2. Системы сбора информации. Система мониторинга комплекса управления безопасностью**

Система функционального мониторинга представляет собой автоматизированную систему контроля и диагностики технического состояния НТО ТК и СК. Она является одним из компонентов КУБ.

Основной задачей для этой системы является «определение состава диагностических признаков (контрольных точек и измеряемых параметров), обеспечивающих полную наблюдаемость объекта диагностирования. Полная наблюдаемость объекта означает возможность определения любого его состояния в любой момент времени по данным выполняемых измерений» [92].

Современный уровень развития теории и практики построения средств контроля позволяет использовать современную элементную базу, обладающую высокими показателями информационной емкости, на-

дежности и оперативности. Сегодня достаточно развиты теоретические основы построения средств контроля и управления сложными технологическими процессами [93, 94]. Тем не менее при создании системы мониторинга НТО ТК и СК возникает необходимость решать новые научно-технические задачи, связанные со спецификой объектов (уникальностью и разнообразием физической природы элементов) и целями контроля (функциональный мониторинг).

Одной из основных задач создания системы функционального мониторинга НТО ТК и СК является формирование диагностической модели объекта мониторинга [92], которая должна содержать «априорные сведения об объекте диагностирования и его технических состояниях». На основе этой модели должны формироваться диагностические признаки, обеспечивающие «полную наблюдаемость» объекта мониторинга.

Вопросы обоснования количества и видов информации в средствах контроля и управления обсуждались в работах Винера Н. [95], Колмогорова А.Н. [96] и др. Применительно к информационно-управляющим системам ракетно-космической техники вопросы моделирования рассматривались в работах Резникова Б.А. [97], Юсупова Р.М. и Дмитриева А.К. [94] и др. [98 ÷ 101], в которых приводятся библиография и содержательный обзор работ по вопросам идентификации и технической диагностики.

Количество рекомендаций для формирования диагностических моделей НТО ТК и СК весьма ограничено. В частности, вопросы обоснования информации для эргатических систем контроля и управления технологическим оборудованием ТК и СК преимущественно направлены на обеспечение и совершенствование показателей эргономичности комплексов. Упоминание же о

таких задачах на практике обычно сопровождается предпосылками о наличии исходного множества контролируемых параметров. Так, в руководящих документах [100] и общих технических требованиях к АСУ ТК и СК [101] содержится лишь перечисление функций («измерение и документирование физических параметров, контроль выполнения технологических операций при работах на СК и ТК, выдача информации о ходе выполнения технологических операций» и пр.). В конкретных же ТТЗ [104] приводятся ссылки на требования нормативно-технических документов («перечень параметров, подлежащих диагностированию должен соответствовать ГОСТ 27518-87, ГОСТ 20911-89, контролепригодность – в соответствии с ГОСТ 26656-85») и общие рекомендации («составные части КАСУ УСК должны быть оснащены совместно с системами, комплектами и агрегатами необходимыми средствами технического диагностирования, позволяющими осуществлять оперативную оценку их технического состояния», «номенклатура и количество средств измерений, входящих в систему, должны быть необходимыми и достаточными и обеспечивать измерение параметров и характеристик с требуемой точностью»). Следует заметить, что в упомянутом документе отсутствуют какие-либо рекомендации по формированию и проверке условий необходимости и достаточности.

Применительно к НТО ТК и СК вопросы прогнозирования долговечности рассмотрены в содержательной монографии Миронова А.Н. [105]. В ней задача обоснования объема контролируемой информации для оценивания технического состояния методологически представлена принципом минимизации размерности описания, в соответствии с которым объект должен описываться «минимальным числом переменных и па-

раметров, обеспечивающих заданную точность и достоверность прогноза». Соглашаясь с целесообразностью использования этого принципа, заметим, что его конструктивное выполнение возможно лишь при наличии, во-первых, исходного множества характеристик (переменных и параметров), которое предстоит минимизировать, во-вторых, заданных точности и достоверности прогноза.

Формирование множества характеристик объектов функционального мониторинга является исходным этапом для создания соответствующей системы функционального мониторинга. Трудности решения этой задачи для объектов НТО ТК и СК состоят в следующем:

Во-первых, объекты функционального мониторинга имеют в общем случае множество функциональных состояний, каждому из которых соответствуют свои условия и режимы функционирования, действующие нагрузки и диагностические признаки. Результаты контроля технического состояния объекта мониторинга необходимо сопоставлять с условиями конкретного функционального состояния. Система функционального мониторинга должна содержать модели с множеством функциональных состояний и методики их перечисления.

Во-вторых, условия функционирования, действующие нагрузки и характеристики объектов мониторинга в одних функциональных условиях в общем случае зависят от условий функционирования в предыдущих состояниях. Отсюда следует, что результаты контроля технического состояния необходимо сопоставлять с предысторией функционирования. Для построения систем функционального мониторинга необходимы модели, сохраняющие предысторию процессов функционирования.

В-третьих, одни и те же свойства объектов НТО ТК и СК могут быть оценены различными характеристиками (показателями и признаками) или их сочетаниями. Для распределенных в пространстве объектов характеристики должны контролироваться в различных точках, что увеличивает их множество. Оцениваемые характеристики должны быть доступны для функционального контроля и достаточны для идентификации технического состояния.

В-четвертых, одни и те же характеристики объектов НТО ТК и СК могут быть измерены на основе различных физических принципов, которые в свою очередь могут быть материально реализованы различными техническими средствами встроенного контроля. При этом конструктивное исполнение и установка на объекте технических средств должны рационально сочетаться с конструктивно-компоновочными свойствами основных элементов объекта и не снижать показателей целевой эффективности наземного комплекса КРК.

Таким образом, для формирования множества характеристик объектов функционального мониторинга возникает необходимость в решении задачи оптимизации, специфика которой состоит в следующем:

- исходное множество вариантов оптимизируемого множества практически бесконечно;
- для генерации вариантов отсутствуют регулярные формализуемые подходы;
- критерий оптимизации не может быть выражен аналитически и имеет вид критерия сравнения (выбора) в метрике нечетких лингвистических шкал;
- оптимизируемые множества характеристик должны удовлетворять условиям контролируемости, достаточности, конструктивно-компоновочной реализуемости и рациональности.



Под контролируемостью понимается возможность измерения характеристик технического состояния в процессе штатного функционирования имеющимися техническими средствами.

Достаточность состоит в обеспечении возможности идентификации технического состояния объекта контроля в любой момент времени функционирования по выбранному множеству характеристик. Проверка этого условия связана с необходимостью разработки диагностической модели, отражающей процесс функционирования и возможные изменения технического состояния объекта мониторинга. Поскольку под техническим состоянием понимается «совокупность подверженных изменению свойств изделия, характеризующая в определенный момент времени степень соответствия фактических показателей установленным в виде нормативных показателей» [106], то это условие может быть сформулировано в виде следующего очевидного принципа: информация, получаемая системой функционального мониторинга, должна быть достаточна для идентификации технического состояния объекта мониторинга в любом его функциональном состоянии и доступна для измерения. При этом желательно, чтобы объем этой информации был минимально необходимым.

Условие конструктивно-компоновочной реализуемости выполняется, если компоновка дополнительных технических средств контроля на объекте мониторинга не снижает качества выполнения целевой задачи.

Условие рациональности состоит в возможности получения положительного экономического эффекта от функционального мониторинга объекта НТО ТК и СК за период жизненного цикла без снижения его целевой эффективности.

Особенности объектов функционального мониторинга НТО ТК и СК состоят в том, что взаимодействие НТО с РКН и между собой проявляется, во-первых, в наличии энергообмена и соответствующих зависимостей между характеристиками РКН и НТО и, во-вторых, в общности условий функционирования, проявляющихся в соответствии эксплуатационных нагрузок функциональному состоянию СК и ТК. С этих позиций целесообразно в качестве исходного объекта моделирования выделить часть НТО ТК и СК, включающую РКН и соответствующие системы и агрегаты НТО. В состав НТО в общем случае входят механизмы и силовые конструкции, механические, гидравлические и пневматические силовые приводы, а также пневмогидравлические системы заправки, газоснабжения, теплоснабжения и пр. Здесь следует заметить, что установившиеся определения систем как «гидравлических и пневматических» являются условными и отражают не физическую сущность самих систем, а их функциональное назначение. Гидравлическими или пневматическими системами они называются лишь потому, что цели их функционирования состоят в передаче потоков жидкостей или газов от источников к потребителям и преобразовании свойств этих сред в процессе передачи или хранения. Элементы этих систем по своей физической сущности являются механизмами и силовыми конструкциями, функционирующими при влиянии факторов деградации, которые проявляются в виде механических, тепловых и химических воздействий, изменяющих параметры и характеристики объектов при их эксплуатации.

Модель НТО ТК и СК может быть получена путем разбиения НТО ТК и СК на части, которые выполняют при функционировании однородные в физическом смысле преобразования. Как сложная система наземный

комплекс КРК должен исследоваться и моделироваться в соответствии с концепцией «управляющей системы».

В процессе функционирования наземный комплекс КРК может находиться в различных функциональных состояниях, в каждом из которых при функциональном мониторинге следует оценивать техническое состояние. Перечисление функциональных состояний НТО ТК и СК и их характеристик как объектов мониторинга целесообразно проводить на основе анализа их структуры, функциональных состояний, алгоритмов, стационарных и переходных процессов функционирования.

Основные методы проведения анализа НТО ТК и СК в традиционной постановке представлены в [62]. Излагаемые далее методы и методика построения диагностических моделей являются конкретизацией методологических принципов и методов анализа НТО ТК и СК с учетом следующих их особенностей как объектов функционального мониторинга:

1. Объектами анализа являются технические средства, работающие в условиях воздействия не только обычно учитываемых факторов внезапных отказов, но и постоянно действующих факторов деградации (износа, остаточных деформаций, физико-химических изменений материалов). Эта особенность вызывает необходимость корректировки моделей, в частности:

- учета в моделях и методах анализа не только изменений свойств функциональных элементов, но и свойств материалов конструкций, а также материалов элементов, их поверхностей и защитных покрытий путем введения специальных условий окончания декомпозиции и дополнительных уровней декомпозиции объектов мониторинга;

- введения в модели элементов и их соединений «виртуальных» элементов, отражающих появление новых структурных и функциональных свойств из-за деградации (например, элементов, учитывающих появление «люфтов в соединениях», изменение прочности, жесткости, формы и пр.);
- применения специальных моделей для описания динамики деградирующих элементов (например, уравнений динамики неголономных соединений и систем).

2. Цель анализа состоит в построении комплекса диагностических моделей, обеспечивающих контроль (идентификацию) технического состояния НТО ТК и СК в любой момент (такт) функционирования с учетом факторов, влияющих на техническое состояние. Эта особенность вызывает необходимость перечисления функциональных состояний НТО ТК и СК путем совместного анализа состояний объектов НТО как управляющих систем и РКН как объекта управления.

Целью анализа объектов функционального мониторинга является построение формализованной диагностической модели, на основе которой формируется множество характеристик, контролируемых в процессе функционального мониторинга, и обосновывается достаточность этих характеристик для полного контроля технического состояния НТО ТК и СК. Источником информации для построения диагностической модели должен быть рабочий проект наземного комплекса КРК, откуда выявляются исходные данные для анализа, включающие технические описания объектов НТО и инструкции по эксплуатации объектов мониторинга.

Первым этапом анализа является формализация исходных данных. Для описания функционирования КУБ может быть использована концепция управляющей

системы. В соответствии с этой концепцией функционирование КУБ может быть представлено как процесс управления «состоянием НТО ТК и СК», свойства которых преобразуются в процессе подготовки их к пуску.

Для формализации исходных данных используется метод представления объекта НТО СК или ТК в системном пространстве состояний числовыми кодами.

Для этого в рассмотрение вводится «системное пространство состояний» объекта управления в виде вектора  $\mathbf{Z} = (\mathbf{U}, \mathbf{\Omega}, T)$ , где  $\mathbf{U}$  – вектор положения объекта в системном пространстве,  $\mathbf{\Omega}$  – вектор внутренних свойств объекта,  $T$  – тактовое время. В качестве координат вектора  $\mathbf{U}$  положения принимается координата « $u_i(t)$ » – положение продольной оси объекта ( $i$  – номер состояния). В качестве вектора  $\mathbf{\Omega}$  принимается координата « $\omega_j(t)$ » ( $j$  – номер состояния).

Возможные положения объекта по координате « $u_i(t)$ » могут быть условно представлены следующими кодовыми значениями:

$$u_i(t) = \begin{cases} 0 - \text{горизонтально} \\ 1 - \text{промежуточное } P_1 \\ 2 - \text{промежуточное } P_2 \\ 3 - \text{вертикальное} \end{cases}$$

Возможные положения объекта по координате « $\omega_j(t)$ » могут иметь состояния:

$$\omega_i(t) = \begin{cases} 0 - \text{связи не наложены} \\ 1 - \text{связи наложены} \end{cases}$$

Объект может находиться только в одном из состояний по каждой из координат «системного пространства», а изменение функционального состояния проис-

ходит мгновенно (заметим, что при этом не теряется общность подхода, поскольку дополнительные состояния при переходах могут быть учтены простым расширением элементов системного пространства).

При условии независимости координат множество состояний объекта описывается как декартово произведение множеств состояний по всем координатам. Однако в реальности координаты  $U$  и  $\Omega$  являются зависимыми из-за наличия общих ограничений пространственного, технологического и конструктивно-компоновочного характера. В общем случае подобные ограничения не формализуемы, поэтому состояния объекта следует вначале перечислить без учета зависимости координат, а затем исключить противоречащие ограничениям состояния.

Перечень состояний может быть получен морфологическим перебором или как декартово произведение множеств состояний по двум координатам. Поскольку число состояний по различным координатам различно, то кодирование состояний проводится по следующему общему соотношению:

$$z = \sum_{i=0}^m \left( \prod_{j=0}^{i+1} n_j \right) \cdot x_m,$$

где  $x_i$  — код состояния соответствующей координаты,  $n_i$  — число состояний соответствующей координаты. Возможное множество кодов состояний перечислено в таблице 3.1.

Табл.3.1

Коды состояний объекта (вариант)

|               |          |          |          |          |   |   |   |          |
|---------------|----------|----------|----------|----------|---|---|---|----------|
| $u_i(t)$      | <b>0</b> | <b>1</b> | <b>2</b> | <b>3</b> | 0 | 1 | 2 | <b>3</b> |
| $\omega_i(t)$ | <b>0</b> | <b>0</b> | <b>0</b> | <b>0</b> | 1 | 1 | 1 | <b>1</b> |
| $z_i(t)$      | <b>0</b> | <b>1</b> | <b>2</b> | <b>3</b> | 4 | 5 | 6 | 7        |

Анализ ограничений на реализуемость состояний позволяет установить, что нереализуемые состояния, например, имеющие коды 4, 5 и 6. Реализуемые состояния можно выделить в таблице жирным шрифтом.

При использовании такого кодирования поведение объекта управления может быть представлено траекторией изображающей точки  $z$  в пространстве  $Z$ . На рис. 3.3 представлен вариант модели в виде диаграммы графа переходов, содержащей все возможные переходы объекта управления в «системном «пространстве состояний  $Z(T)$ ».

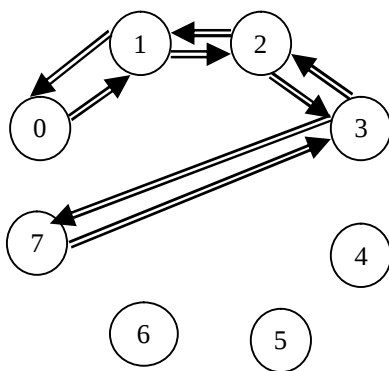


Рис. 3.3. Граф переходов объекта в «системном пространстве» состояний

Каждый переход объекта в указанном пространстве состояний происходит из-за воздействия на объект со стороны КУБ. Каждому переходу объекта СК или ТК соответствует определенное состояние. В каждом функциональном состоянии участвуют различные функциональные элементы, связанные конкретными связями, каждому функциональному состоянию соответствуют в общем случае различающиеся множества диагностических признаков. Задача обоснования этих множеств состоит лишь в том, чтобы сформировать минимальные по мощности, но различные множества диагностических признаков для каждого функционального состояния.

Дальнейшая декомпозиция функциональных состояний КУБ позволяет перечислить функциональные состояния и переходы элементов КУБ, а следовательно, и строго определить эксплуатационные процессы и их характеристики в их конкретном представлении математическими моделями. Очень важным обстоятельством предлагаемого подхода является то, что анализ моделей процесса управления безопасностью в отличие от индивидуального анализа отдельных функциональных состояний позволяет оценивать и интегральные характеристики технологических процессов с учетом предистории функционирования, которые могут дать дополнительно ценную информацию для диагностики технического состояния объектов НТО с учетом процесса функционирования КУБ.

Наиболее важным следствием такого анализа является возможность перечисления конкретных вариантов перехода НТО в неисправные (предельные) состояния.

Диагностические модели в системах функционального мониторинга должны отражать, во-первых, функциональные состояния, реализующиеся в процессе



штатного функционирования объектов мониторинга, и, во-вторых, функциональные состояния, позволяющие выполнить их идентификацию. Для этого необходимо перечислить конкретные причины перехода объектов в неработоспособные (предельные) состояния из-за утраты работоспособности функциональными и конструктивными элементами объектов. Следует заметить, что традиционный подход к понятию «функционального элемента» при анализе объектов мониторинга не всегда является оправданным, так как элемент НТО может считаться функциональным, поскольку воспринимает нагрузки через связи с другими элементами, частично их поглощает и передает другим элементам или окружающей среде. В этом смысле такой элемент также должен считаться «функциональным», обеспечивающим преобразование энергии. Он также может находиться в различных функциональных состояниях в зависимости от уровня эксплуатационных нагрузок.

Функционирование элементов НТО ТК и СК состоит в выполнении последовательности преобразований потоков энергии, определенных алгоритмом управления, т.е. может быть представлено множеством переходов состояний элемента по заданному алгоритму.

Для наиболее распространенного случая, когда элемент « $v_i$ » имеет два различных состояния («рабочее» – «нерабочее»), удобно по аналогии с символикой алгебры логики использовать следующие обозначения состояний и переходов элементов:

$s(\bar{v}_i)$  – элемент находится в исходном (закрытом, выключенном) функциональном состоянии ( $s$  – символ состояния элемента  $v_i$ );  $s(v_i)$  – элемент находится в «рабочем» (открытом, включенном) функциональном состоянии (оба обозначения могут иметь место при наступлении предельного состояния «элемент потерял рабо-

тоспособность, оставаясь в рабочем (включенном, открытом) функциональном состоянии», «элемент потерял работоспособность, оставаясь в нерабочем (выключенном, закрытом) состоянии»);

$(s(\bar{v}_i) \rightarrow s(v_i)) \Leftrightarrow \bar{v}_i$  – включение (переход элемента из исходного в рабочее состояние);

$(s(v_i) \rightarrow s(\bar{v}_i)_i) \Leftrightarrow \bar{v}_i$  – выключение (переход элемента из рабочего в исходное состояние);

$(s(v_i) \rightarrow s(v_i)) \Leftrightarrow (s(\bar{v}_i)_i \rightarrow s(\bar{v}_i)) \Leftrightarrow 1$  – элемент не участвует в переходе.

Для обозначения состояний и переходов элементов, имеющих более двух различных состояний, используется следующая символика:

$s_k(v_i)$  – элемент  $V_i$  находится в состоянии “ $k$ ” (где  $k$  – номер состояния элемента);

$(s_k(v_i) \rightarrow s_l(v_i)) \Leftrightarrow \overset{(k \rightarrow l)}{v_i}$  – элемент  $V_i$  перешел из состояния  $s_k(v_i)$  в состояние  $s_l(v_i)$ .

Множество возможных переходов элемента в пространстве функциональных состояний может быть представлено в виде ориентированного графа  $G_{ПЭ}(S, Y)$  переходов дискретного конечного автомата (рис. 3.4), где  $S$  – множество вершин графа перехода (состояний элемента),  $Y$  – множество дуг графа перехода, описывающих логические условия переходов элемента из предыдущих состояний в последующие.

Граф переходов элемента содержит математическое описание всех возможных переходов, из которых формируются алгоритмы функционирования элемента.

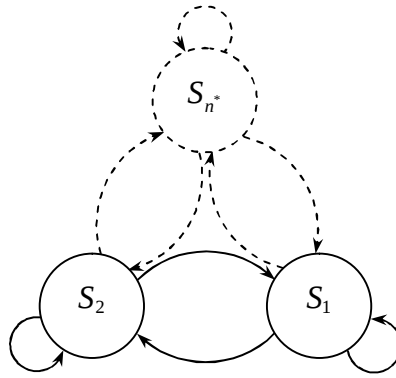


Рис. 3.4 Фрагмент диаграммы перехода элемента

Графу  $G_{ПЭ}(S,Y)$  перехода элемента соответствует матрица  $M_{ПЭ}$  перехода (рис. 3.5), элементы  $m_{kk}$  которой содержат описания «команд» управления  $y_{ij}$  на реализацию переходов из состояния  $i$  в состояние  $j$ .

|                | $s_1(v_i)$                                       | $s_2(v_i)$                                       | $s_3(v_i)$                                       | ... | $s_{n^*}(v_i)$                                   |
|----------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-----|--------------------------------------------------|
| $s_1(v_i)$     |                                                  | $y_{12} \Rightarrow v_i^{(1 \rightarrow 2)}$     | $y_{13} \Rightarrow v_i^{(1 \rightarrow 3)}$     | ... | $y_{1n^*} \Rightarrow v_i^{(1 \rightarrow n^*)}$ |
| $s_2(v_i)$     | $y_{21} \Rightarrow v_i^{(2 \rightarrow 1)}$     |                                                  | $y_{23} \Rightarrow v_i^{(2 \rightarrow 3)}$     | ... | $y_{2n^*} \Rightarrow v_i^{(2 \rightarrow n^*)}$ |
| $s_3(v_i)$     | $y_{31} \Rightarrow v_i^{(3 \rightarrow 1)}$     | $y_{32} \Rightarrow v_i^{(3 \rightarrow 2)}$     |                                                  | ... | $y_{3n^*} \Rightarrow v_i^{(3 \rightarrow n^*)}$ |
| ...            | ...                                              | ...                                              | ...                                              | ... | ...                                              |
| $s_{n^*}(v_i)$ | $y_{n^*1} \Rightarrow v_i^{(n^* \rightarrow 1)}$ | $y_{n^*2} \Rightarrow v_i^{(n^* \rightarrow 2)}$ | $y_{n^*3} \Rightarrow v_i^{(n^* \rightarrow 3)}$ | ... |                                                  |

Рис. 3.5 Фрагмент матрицы переходов элемента

Элемент с двумя состояниями нашел широкое применение в теории надежности, в частности в анализе безотказности и долговечности технических систем. Специфика решаемых в теории надежности практических задач связана с нахождением показателей надежности и рассмотрением двух состояний элемента: работоспособного и неработоспособного. Для обозначения этих состояний вводят индикаторную переменную  $x(v_i)$ , принимающую кодовое значение «1», если элемент работоспособен, и «0» в противном случае:

$$x(v_i) = \begin{cases} 1 & \text{если элемент } v_i \text{ работоспособен} \\ 0 & \text{если элемент } v_i \text{ неработоспособен} \end{cases}$$

В отличие от констатации работоспособности или неработоспособности и дальнейшего определения вероятности перечисленных состояний, что имеет место в задачах исследования надежности, в настоящей работе ставится задача выявления причин и последствий появления неработоспособного состояния. Таких причин и последствий для реальных элементов может быть значительно больше, чем два. В частности, если элемент имеет только два различимых состояния (например, «открыт» и «закрыт» для пневмо- или гидроклапана), то могут реализоваться два вида отказов – отказ в открытом состоянии (когда элемент должен закрыться) и отказ в закрытом состоянии (когда элемент должен открыться). Хотя эти оба состояния отражают в традиционном понимании одно событие – отказ, их последствия и диагностические характеристики, как правило, различны. В частности, специалисты по эксплуатации гидравлических систем хорошо знают, что отказ насоса при включении менее опасен, чем при выключении; потеря работоспособности силового элемента в нагруженном

состоянии более опасна, чем в исходном и т.д.

В связи с этим целесообразно рассмотреть элемент в смешанном пространстве функциональных и технических состояний, поскольку идентификация технического состояния в различных функциональных состояниях проводится на основе различных признаков и значений контролируемых параметров. Функциональное состояние элемента отражает его способности преобразования свойств вещественных и энергетических потоков, а техническое состояние — соответствие определенных характеристик установленным в технической документации. При этом предельное состояние может наступить при различных функциональных состояниях.

Таким образом, для решения рассматриваемых в работе задач каждый элемент  $V_i$  рассматривается как сложный, т.е. считается, что он может находиться в  $n^*$  различных функциональных состояниях  $s_n(v_i)$ . Причем в каждом конкретном такте одно из функциональных состояний элемента является работоспособным, а оставшиеся  $n^* - 1$  для данного такта определяются как различные по свойствам предельные состояния.

В этом случае для обозначения состояний и переходов элементов предлагается использовать следующую символику:

$s_k^+(v_i)$  — элемент  $V_i$  находится в работоспособном состоянии ( $k$  — номер функционального состояния);

$s_k^-(v_i)$  — элемент  $V_i$  находится в неработоспособном состоянии;

$(s_k^+(v_i) \rightarrow s_l^+(v_i)) \Leftrightarrow \overset{(k^+ \rightarrow l^+)}{v_i}$  — элемент  $V_i$  перешел

из работоспособного состояния  $s_k^+(v_i)$  в работоспособное состояние  $s_l^+(v_i)$ ;

$(s_k^+(v_i) \rightarrow s_l^-(v_i)) \Leftrightarrow \overset{(k^+ \rightarrow l^-)}{v_i}$  – элемент  $v_i$  перешел из работоспособного состояния  $s_k^+(v_i)$  в неработоспособное состояние  $s_l^-(v_i)$ .

Переходы между работоспособными состояниями реализуются командами управления, поступающими на элемент в соответствии с заданным алгоритмом функционирования, а переходы в неработоспособные состояния происходят самопроизвольно в результате деградации элементов.

Множество возможных переходов элемента с учетом введенных понятий и обозначений представляется в виде ориентированного графа  $G_{пэ}^*(S, Y)$  перехода (рис. 3.6), где  $S$  – множество вершин графа перехода (состояний элемента),  $Y$  – множество дуг графа перехода, описывающих логические условия переходов из предыдущих состояний в последующие.

Тупиковые («висячие») вершины в графе  $G_{пэ}^*(S, Y)$  определяют предельные состояния, в которые переходит элемент в результате отказов отдельных функциональных и конструктивных элементов следующего уровня декомпозиции.

В частности, для гидравлического клапана такими элементами будут корпус, пружина, запорный элемент, седло и т. п.

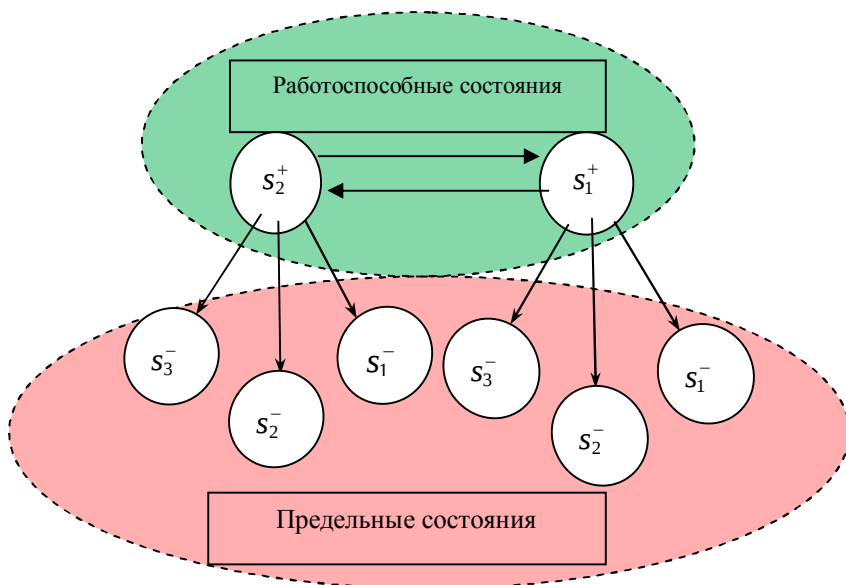


Рис. 3.6. Фрагмент диаграммы графа переходов элемента с двумя функциональными состояниями

Таким же образом представляется возможным разделить множество возможных переходов элемента на два непересекающихся подмножества:

подмножество штатных переходов  $Y^+ = \{y_k^+\}_{k^*}$  (где

$k \in K_{\{k^*\}} = \{1, 2, \dots, k^*\}$ ) из одного состояния в другое и

подмножество переходов  $Y^- = \{y_p^-\}_{p^*}$  (где

$p \in P_{\{p^*\}} = \{1, 2, \dots, p^*\}$ ) в предельные состояния.

Основой моделирования переходов элемента из одного технического состояния в другое с учетом множества функциональных состояний является дискретная модель (рис. 3.7) в виде дерева функционирования.

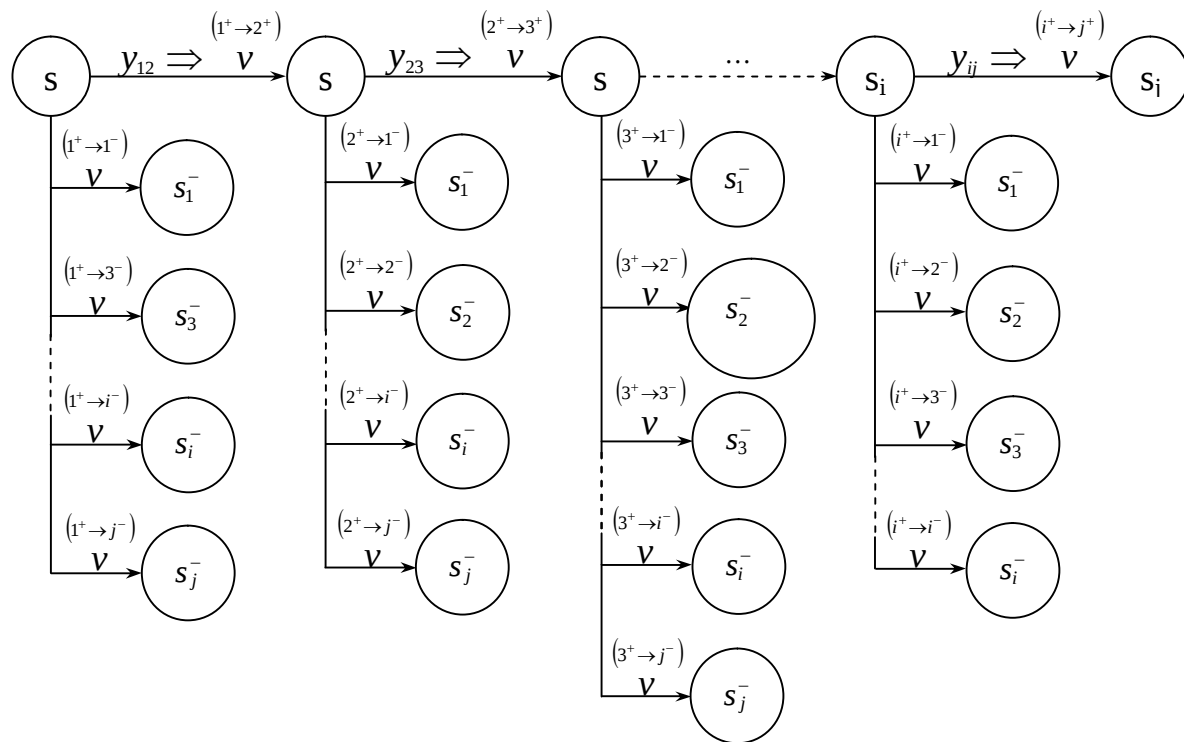


Рис. 3.7 Фрагмент дерева нештатного функционирования элемента



Модель образована деревом штатного функционирования в виде развернутого по оси тактового времени ациклического графа перехода для заданного алгоритма функционирования, безотказное выполнение которого описывается «стволом» дерева функционирования, являющегося путем  $L_{ПЭ}(S^+, Y^+, T)$  штатного функционирования.

Для описания отклонений от штатного функционирования производится ветвление ствола дерева в каждом  $i$ -ом такте функционирования, т.е. из каждого штатного состояния  $S_n^+$  элемента формируется множество переходов в предельные состояния  $Y_i^- = \{y_{ig}\}_{g^*}$ , где  $g \in G_{\{g^*\}} = \{1, 2, \dots, g^*\}$ ,  $g^*$  – число нештатных переходов в  $i$ -ом такте функционирования, характеризующих наступление событий отказа (перехода в предельное состояние) элемента.

Приведенные модели описывают процессы функционирования объектов НТО любого уровня декомпозиции. Любой объект промежуточных уровней иерархии может быть представлен как элемент системы более высокого уровня или как система для элементов более низкого уровня иерархии.

### **3.3. Технология сбора информации о техническом состоянии объектов технологического оборудования технических и стартовых комплексов**

Приведенные выше методологические принципы и математические модели позволяют решать задачу обоснования достаточности и необходимости информации о безопасности функционирования для конкретных объектов НТО ТК и СК следующим образом.

Для обоснования достаточности и необходимости информации предлагается использовать модели функционирования элементов НТО ТК и СК с учетом возможных переходов оборудования в предельные состояния. Соответствующие процедуры получения этих моделей на основе анализа объектов управления достаточно подробно рассмотрены в [62].

Их последовательность может быть кратко представлена следующими этапами:

- построение иерархии объектов функционального мониторинга, в том числе агрегатов, систем и подсистем агрегатов, функциональных элементов, конструктивных узлов, соединений, деталей и материалов НТО ТК и СК;
- определение комплекса моделей и характеристик для элементов соответствующих уровней декомпозиции в соответствии со схемой межуровневых переходов;
- определение комплекса физических принципов контроля характеристик и реализующих их технических средств контроля по методике, представленной в [107];
- анализ распознаваемости различных функциональных и технических состояний (представленных в моделях функционирования объектов мониторинга) на основе контроля характеристик функциональных и технических состояний выбранными средствами контроля (анализ достаточности информации).

Объективное оценивание достаточности комплекса характеристик возможно на основе анализа распознаваемости предложенных в [107] моделей функционирования существующими средствами контроля. Принцип оценивания состоит в следующем. Пусть построены модели функционирования объекта управления с учетом возможных переходов элементов в предельные состояния по согласованным условиям. Эти условия включают определенные при договоренности заказчика и исполнителя анализа сведения о глубине анализа, полноте представления состояний системы и учете воздействующих факторов. Тогда совокупность характеристик объекта мониторинга достаточна, если по ее показателям могут быть различимы все состояния и переходы, входящие в модель. Объективная проверка этого условия выполняется путем кодирования состояний кортежами значений контролируемых параметров и последующего их сравнения. Если все различные состояния имеют различные коды, то информация достаточна. Если некоторые состояния имеют совпадающие коды, то информация недостаточна и следует дополнить средства контроля.

Анализ необходимости предъявляемой информации имеет целью исключить ее избыточность, не используемую для резервирования. С этой целью из множества контролируемых параметров, при условии их достаточности, исключаются некоторые характеристики с последующим анализом достаточности оставшихся средств контроля. Если после исключения информация остается достаточной, то исключенный параметр был избыточным. Если при исключении параметра свойство достаточности информации не сохраняется, то этот параметр необходим и не должен исключаться. Вполне естественно, что выбор множества параметров и поря-

док их исключения неоднозначны, что вызывает необходимость постановки оптимизационной задачи с организацией направленного и ограниченного перебора вариантов.

Предлагаемые меры позволяют внести большую степень определенности в решение задач организации контроля и управления процессами функционирования агрегатов НТО ТК и СК в нештатных состояниях.

Формирование множества характеристик объектов мониторинга, необходимых и достаточных для оценивания контролируемости и различимости технических состояний, позволяет формулировать и решать задачи обоснования технологий, методов и средств контроля технического состояния НТО ТК и СК. Определение состава технологий контроля объектов НТО ТК и СК при функциональном мониторинге связано с задачей квалиметрии параметров технического состояния. Типовые зависимости  $u(t)$  изменения характеристик (параметров) технического состояния от времени представлены на рисунке 3.8.

Очень часто для оценивания характеристик используются числовые шкалы, т.е. в случае, когда процесс изменения свойств элемента протекает, подчиняясь физике постепенного отказа. Если значение параметра выходит за пределы установленного в нормативно-технической документации диапазона, это свидетельствует о наличии неисправности. В ином случае неисправность отсутствует (рис. 3.8 а, б, в). Например, документацией нормируются предельные значения износа пар трения, предельная протяженность трещин в сварном шве и пр.

Однако зависимость значения параметра от времени может описываться не только алгебраической, но и булевой функцией. Если процесс изменения свойств

элемента подчиняется физике внезапного отказа, то для оценивания величины параметра используются логические шкалы, например, функции Хевисайда (рис. 3.8 г), которой можно описать возникновение дефекта в некотором месте, где ранее такой неисправности не наблюдалось.

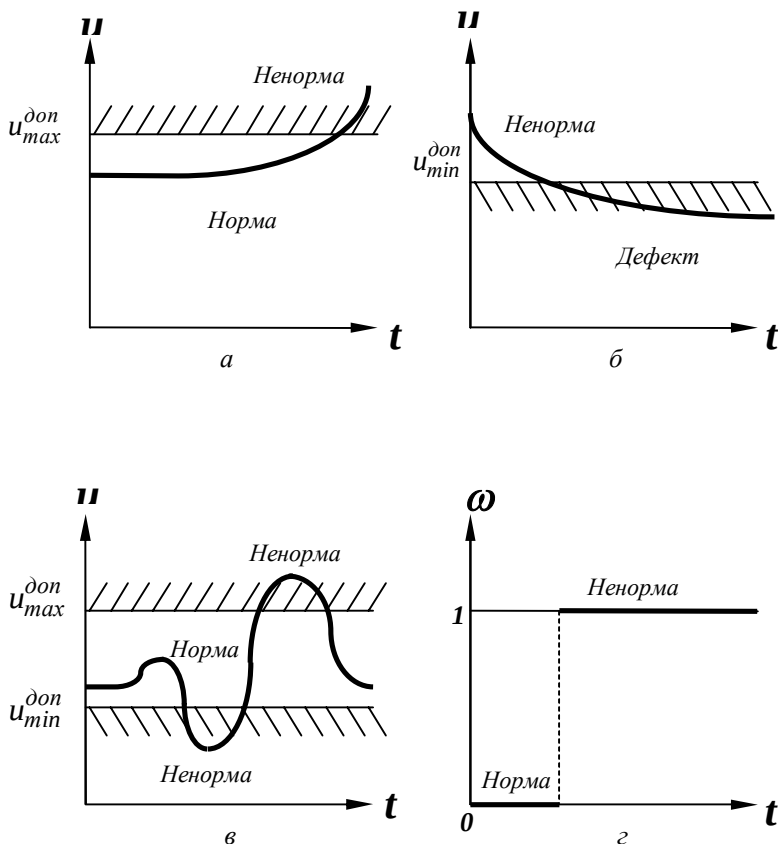


Рис. 3.8 Виды представлений диагностических характеристик

Такие случаи имеют место при возникновении трещин в сварных соединениях, вмятин и выбоин на стенках сосудов при механическом воздействии. Если

нормативно-технической документацией не допускается наличие трещин любой протяженности в сварном соединении, вмятин и выбоин на стенках сосудов, то говорят о возникновении неисправности. Логические шкалы позволяют вести учет не только двух, но и более состояний, что дает возможность использовать более тонкую градацию свойств элементов оборудования.

В ходе организации и осуществления мониторинга технического состояния целесообразно всю совокупность элементов НТО ТК и СК разделить на группы с однотипными контролируемыми параметрами:

- силовые металлоконструкции (стрелы грузоподъемных машин, установщиков, несущие ферменные конструкции, силовые элементы агрегата обслуживания);
- механизмы и машинное оборудование (гидроприводы, редукторы, насосы, приводные двигатели) и т. д.

Каждой из групп оборудования можно поставить в соответствие множество технологий (методов) неразрушающего контроля и номенклатуру технических средств для реализации этих методов. Выбор метода контроля основывается помимо априорного знания о характере неисправностей на учете таких факторов, как условия работы, форма и размеры, физические свойства материала, условия контроля и возможность монтажа технического средства без снижения эффективности штатной работы.

Применение каждого из методов в конкретном случае характеризуется вероятностью правильного измерения характеристики технического состояния. На вероятность правильного измерения характеристики технического состояния влияют чувствительность мето-

да, надежность аппаратуры, условия проведения измерений. Определение вероятности правильного измерения параметра технического состояния является достаточно сложной задачей. Эта задача еще более усложняется, если для повышения достоверности приходится комбинировать методы контроля. Комбинирование методов подразумевает не только использование нескольких методов, но и чередование их в определенной последовательности, в том числе и сочетание функционального мониторинга и специальных обследований по результатам такого мониторинга. Вместе с тем затраты на контроль должны быть по возможности ниже. Таким образом, выбор стратегии применения методов контроля основывается на стремлении, с одной стороны, повысить вероятность правильного измерения параметра технического состояния и, с другой стороны, снизить затраты на проведение измерений.

Анализ различных методов при проведении мониторинга привел к целесообразности применения комплексных систем контроля, которые используют разные по физической природе методы исследования, что позволяет реализовать тем самым принцип «избыточности» для контроля параметров технического состояния элементов НТО. Таким образом, возникает необходимость решения задачи выбора состава комплекса методов в оптимизационной постановке.

В процессе формализации задачи формирования комплекса методов для контроля характеристик технического состояния объектов НТО ТК и СК как оптимизационной задачи математического (дискретного) программирования предположим, что задано конечное множество контролируемых характеристик технического состояния  $d_l \in D$ , где  $D = \{d_l, l \in L = \{1, 2, \dots, l^*\}\}$  –

множество разных типов характеристик, а  $L$  – множество индексов типов параметров (рис.3.9).

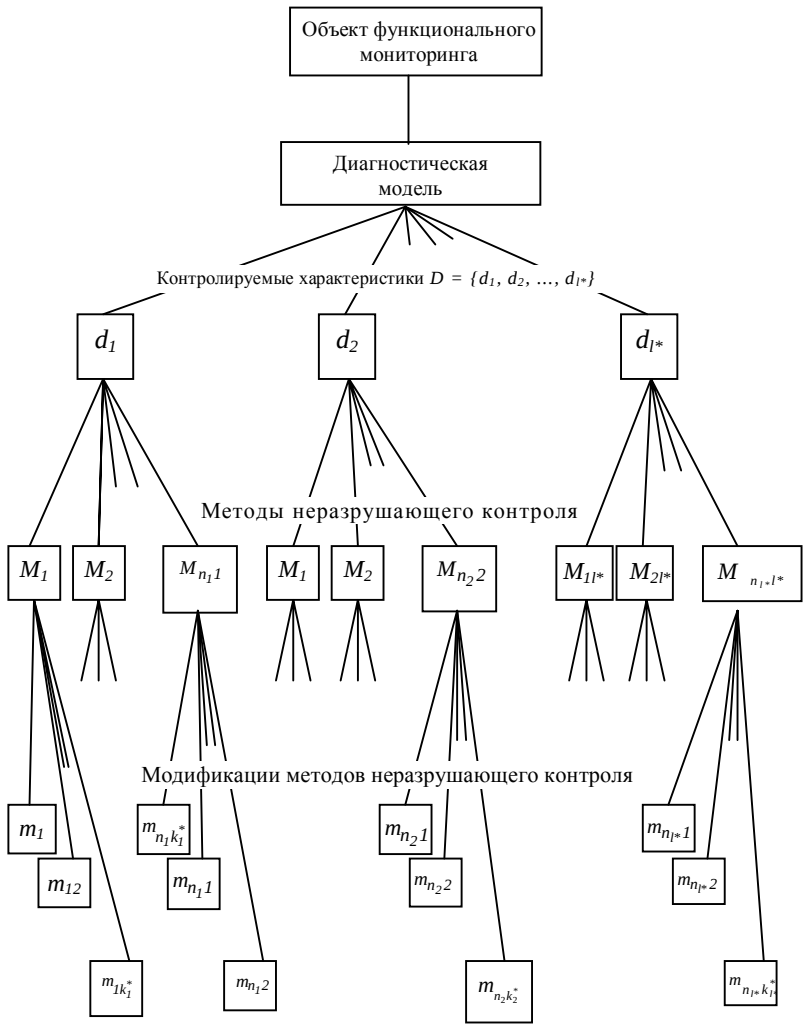


Рис. 3.9 Иерархия методов контроля технического состояния



Предположим, что для контроля характеристик технического состояния  $d_l \in D$  используются различные технологии и методы контроля, которые имеют различные вероятностные характеристики правильного измерения характеристик технического состояния и затрат ресурсов при проведении контроля. Эти характеристики получены обобщением опыта обследований технического состояния в процессе длительной эксплуатации. Обозначим через  $M_{jl} = \{m_{jk}, k \in K_j\}$  множество методов  $j$ -го типа, которые могут использоваться для контроля характеристики  $d_l$ , где  $j \in J_l = \{1, 2, \dots, n_l\}$  – множество индексов типов методов, а  $m_{jk} - k$ -я модификация  $j$ -го метода,  $K_j = \{1, 2, \dots, k_j^*\}$  – множество индексов типов модификаций  $j$ -го метода.

Каждая модификация  $m_{jk}$   $j$ -го метода оценивается показателем  $p_j(m_{jk}, d_l)$  вероятности правильного измерения характеристики  $d_l$ , а также затратами ресурсов  $g_{il}(m_{jk}, d_l)$ ,  $i \in I$ , для организации контроля, такими как трудозатраты метода  $m_{jk}$  при использовании, например, приборов или время, необходимое для осуществления контроля группой специалистов, стоимость контроля и т. д. Переменная  $I = \{1, \dots, i, \dots, i^*\}$  представляет собой множество индексов показателей затрат ресурсов.

Для множества возможных характеристик технического состояния  $D$  необходимо построить такой комплекс методов (совокупность приборов и порядок их использования), применение которого было бы наибо-

лее рациональным при контроле характеристик технического состояния  $d_l \in D$  элементов НТО ТК и СК (рис.3.10).

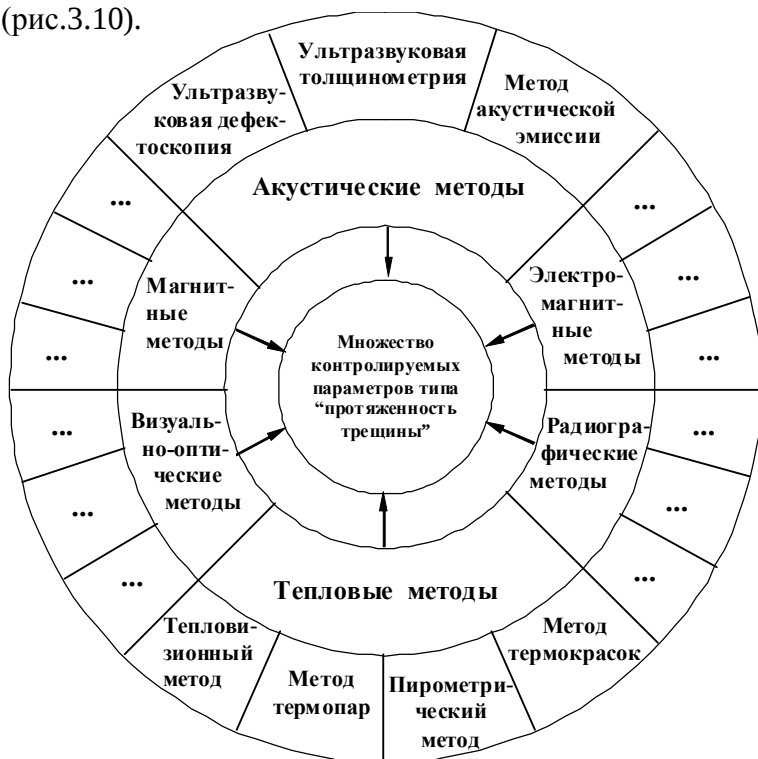


Рис. 3.10 Объект, методы и характеристики функционального мониторинга

При нахождении оптимального состава методов необходимо отметить, что поиск осуществляется с учетом множества всех технологий, которые могут быть задействованы при контроле множества характеристик технического состояния  $D$ .

Обозначим через

$$S_l = \{s_l = \{j_1, j_2, \dots, j_{l^*}\} \mid j_1, j_2, \dots, j_{l^*} \in J_l\}$$

множество сочетаний  $S_l$  типов методов, которые используются для контроля параметра технического состояния  $d_l$ . Сочетание  $S_l$  можно интерпретировать как технологию применения совокупности методов для диагностики систем и агрегатов НТО, в которой учитывается как специфика приборной базы для осуществления эффективного контроля, так и специфика систем и агрегатов.

Для каждого сочетания  $S_l$  определим комплекс  $v_{s_l} = (m_{jk})_{j \in s_l}$  различных типов методов, которые могут быть использованы для контроля характеристик технического состояния  $d_l \in D$ . Будем предполагать, что очередность применения методов зафиксирована порядком индексов в сочетании  $S_l$ . Это обосновано существующим опытом очередности применения различных методов при исследовании различных типов систем.

Для формализации задачи определим следующие множества методов, которые:

- определяют возможные варианты реализации технологии  $S_l$ :

$$V_{s_l} = \bigotimes_{j \in S_l} M_{jl};$$

- могут быть использованы для контроля характеристики технического состояния  $d_l$ :

$$V_l = \bigcup_{s_l \in S_l} V_{s_l}.$$

Тогда множество комплексов для контроля совокупности характеристик технического состояния  $d_l \in D$  определяется следующим образом:

$$V = \bigotimes_{l \in L} V_l.$$

Определим вероятность обнаружения неисправности через показатели вероятности правильного измерения характеристики технического состояния отдельными методами, которые входят в технологии  $S_l$ .

Объективное оценивание технического состояния НТО существенно затруднено наличием эффекта взаимовлияния его элементов друг на друга, которое усиливается в процессе его длительной эксплуатации. Для увеличения достоверности контроля технического состояния в этих условиях целесообразно использовать принцип «избыточности» (резервирования) контроля и при оценивании одного и того же параметра (при контроле) применять комплекс различных по физической природе методов.

Принимая во внимание, что использование совокупности различных методов, способов (технологий), а также последовательности их применения увеличивает вероятность правильного измерения характеристик технического состояния, выражение для вероятности правильного измерения параметра  $d_l$  комплектом  $V_{S_l}$  при использовании фиксированного множества методов в технологии  $S_l$  может быть определено следующим образом:

$$P(v_{S_l}) = 1 - \prod_{j \in J_l} (1 - p_j(m_{jk}, d_l)). \quad (3.1)$$

Формула (3.1) дает нижнюю оценку для вероятности правильного измерения характеристики технического состояния комплексом методов  $V_{s_l}$ .

Анализ практического использования различных методов показывает, что, например, вероятность обнаружения дефекта методом ультразвуковой дефектоскопии возрастает, если перед этим использовать метод акустической эмиссии.

Комплексное использование методов, как и все диагностирование в целом, направлено на выявление действительного состояния, повышение безотказности, качества и снижение риска при эксплуатации систем и агрегатов СК и ТК.

Характеристики технического состояния во множестве  $D$  могут иметь различную важность и поэтому можно говорить о недопустимости неправильного измерения характеристики технического состояния или возможности неправильного измерения. В связи с этим при анализе задачи возможны рассматриваемые ниже случаи, которые приводят к различным формальным постановкам оптимизационных задач и расчетным формулам вероятности правильного измерения множества характеристик технического состояния через вероятности правильного измерения отдельных параметров технического состояния.

Оценивание характеристик технического состояния имеет следующую процедуру.

Пусть  $x_l$ ,  $l \in L$  – булева переменная, такая что

$$x = \begin{cases} 0, & \text{допустимо неправильное измерение параметра} \\ 1, & \text{недопустимо неправильное измерение параметра} \end{cases}$$

Тогда  $x = (x_1, \dots, x_l, \dots, x_{l^*})$  –  $l^*$ -мерный вектор возможных комбинаций правильного измерения характеристик технического состояния. Пусть  $X$  – множество всех возможных комбинаций  $x \in X$ . Если, например,  $x = (1, \dots, 1)$ , то эта комбинация означает, что в НТО не допускается ни одного неправильного измерения характеристики технического состояния а, например, при  $x = (0, 1, \dots, 1)$  допускается неправильное измерение одной характеристики технического состояния  $d_1$ .

Определим на множестве возможных комбинаций  $x \in X$  следующую индикаторную булеву функцию  $\omega(x)$ :

$$\omega(x) = \begin{cases} 0, & \text{комбинация } x \text{ недопустима для объекта контроля} \\ 1, & \text{комбинация } x \text{ допустима для объекта контроля} \end{cases}$$

Например, если  $x = (1, \dots, 1, 0, 1, \dots, 1)$  и  $\omega(x) = 1$ , то для элементов оборудования допускается неправильное измерение характеристик технического состояния  $d_l$ .

Таким образом, используя информацию о комбинациях  $x$ , все множество комбинаций  $x \in X$  можно разделить на допустимые и недопустимые комбинации. Это разделение может быть сделано исходя из опыта и знания значимости характеристик технического состояния в различных элементах НТО.

В общем случае функция  $\omega(x)$  может задаваться на интервале  $0 \leq \omega(x) \leq 1$  и оцениваться показателем условной вероятности состояния  $x$  или «весом» ком-

бинации  $x$ , в котором неправильное измерение характеристик технического состояния не приведет к возникновению опасных ситуаций для объекта контроля в целом [114].

При данных предположениях показатель  $P_D(v)$  есть вероятность правильного измерения множества параметров технического состояния при условии, что комплексом методов допускается неправильное измерение несущественных параметров. Этот показатель может быть выражен следующим образом:

$$P_D(v) = \sum_{x \in X} \omega(x) \prod_{l \in L} P(v_{s_j})^{x_l} (1 - P(v_{s_l}))^{1-x_l},$$

где  $P(v_{s_l})$  определяется по формуле (3.1).

Данное выражение может рассматриваться как достоверность контроля или достоверность правильного измерения характеристик технического состояния.

Необходимо сформировать такой вариант комплекса методов  $v = (v_{s_l}) \in \bigotimes_{l \in L} V_l$ , который имеет максимальную вероятность правильного измерения множества характеристик технического состояния («покрывает все множество параметров технического состояния  $D$ ») с учетом заданных ограничений  $b_i$ ,  $i \in I = \{1, \dots, i^*\}$  на ресурсы. Значения  $b_i$ ,  $i \in I$  задаются экономически приемлемыми (необходимыми при выполнении операций контроля), так как экономия затрат может привести к возникновению аварийных ситуаций и сопровождаться убытками, которые несопоставимы с затратами на проведение контроля.

Таким образом, формальная модель задачи выбора комплекса методов для множества характеристик технического состояния  $D$  формулируется следующим образом:

$$P_D(v) = \max_{v \in V} \left\{ \sum_{x \in X} \omega(x) \prod_{l \in L} P(v_{s_l})^{x_l} (1 - P(v_{s_l}))^{1-x_l} \right\} \quad (3.2)$$

при ограничениях на затраты по ресурсам

$$G_i(v) = G_i(g_{i1}(v_{s_1}), \dots, g_{il}(v_{s_l}), \dots, g_{il^*}(v_{s_{l^*}})) \leq b_i, i \in I, \quad (3.3)$$

$$v = (v_{s_1}, v_{s_2}, \dots, v_{s_{l^*}}) \in V = \bigotimes_{l \in L} V_l. \quad (3.4)$$

Показатели затрат ресурсов  $G_i(v)$ ,  $i \in I$  на использование системы контроля с комплексом методов  $V$  определяются, например, суммарной стоимостью контроля с использованием методов, которые входят в комплекс. Также необходимо учитывать стоимость вспомогательных операций, которые сопутствуют контролю, стоимость затрат, связанных с расходом энергии и использованием помещений, стоимость ЗИП, возможных убытков из-за браковки и т. д. Таким образом,  $G_i(v)$  является аддитивной функцией вида [109 ÷ 111]:

$$G_i(v) = \sum_{l \in L} g_{il}(v_{s_l}), i \in I.$$

В свою очередь показатели затрат ресурсов для вектора  $v_{s_l}$  будут определяться так:

$$g_{il}(v_{s_l}) = \sum_{j \in s_l} g_{il}(m_{jk}, d_l), i \in I, l \in L.$$

В общем случае показатели затрат ресурсов могут вычисляться более сложно, задаваться таблично, зависеть от технологии  $s_l$  применяемых методов.



Далее вектор  $v = (v_{s_l})_{l \in L}$  будем называть комплексом методов для множества характеристик технического состояния  $D$ , а  $v_{s_l}$  – подкомплексом для измерения характеристики технического состояния  $d_l$  при использовании технологии  $s_l$ .

Для характеристик технического состояния повышенной значимости могут устанавливаться требования  $P_l^*$  – по вероятности правильного измерения этих характеристик технического состояния. Тогда к модели (3.2 ÷ 3.4) может быть добавлено следующее ограничение:

$$P_l(v_{s_l}) \geq P_l^*,$$

которое задает требования по вероятности правильного измерения характеристик технического состояния  $d_l$  при использовании подкомплекта  $v_{s_l}$ .

Комплекс  $v \in V$  назовем возможным комплексом или возможным решением задачи (3.2 ÷ 3.4). Вектор  $v \in V$ , удовлетворяющий ограничениям (3.3), назовем допустимым, а допустимый комплекс  $v^*$ , который максимизирует критерий (3.2), назовем оптимальным комплексом или оптимальным решением задачи (3.3, 3.4).

Сформулированная задача по своей классификации в теории дискретной оптимизации представляет собой специальную двухуровневую задачу дискретного монотонного программирования большой размерности [109].

Для решения задачи в данной постановке применение стандартных методов дискретной оптимизации

затруднено или невозможно, так как: во-первых, целевая функция (3.2.) является несепарабельной функцией дискретного аргумента, во-вторых, задача имеет достаточно много ограничений и переменные (подкомплекты) строятся и формируются по определенной технологии применения методов контроля. Явное построение множества возможных решений  $V_i$  в этом случае не представляется возможным из-за большого числа возможных решений. Это касается как метода динамического программирования [112], метода последовательного улучшения планов [113], так и других известных «одноуровневых» методов дискретного программирования [111, 114 ÷ 116].

Формализация данной задачи как задачи, представленной в виде одноуровневой модели, приводит к задаче большой размерности, и воспользоваться ее спецификой для построения эффективного алгоритма на основе известных методов решения [114, 116] практически невозможно, так как необходимо перечислять большое число переменных с учетом механизма формирования подкомплектов.

Для решения исследуемой задачи возможно использование двухуровневой алгоритмической схемы, которая базируется на методе последовательного анализа и отсеивания вариантов [114, 116]. Этот метод хорошо зарекомендовал себя для решения сложных задач оптимального резервирования при проектировании систем, планирования технического обслуживания и анализа сложных систем.

В каждом конкретном случае (при построении алгоритма решения прикладной задачи согласно методу последовательного анализа вариантов) и исходя из анализа прикладной задачи приходится разрабатывать пра-

вила и процедуры исключения заведомо бесперспективных решений.

Однако конкретизация указанного метода невозможна без определения конкретных механизмов (алгоритмов) формирования множеств возможных решений на каждом уровне. Она требует указания классов функций, используемых в математической модели, и множеств переменных, где они задаются и вычисляются.

В настоящей работе, в отличие от рассматриваемых в [43] прикладных задач, при анализе исследуемой задачи определены множества типов методов контроля, зафиксированы способы формирования из элементов подкомплектов за счет использования технологий применения совокупности методов, определены способы формирования комплексов для измерения множества характеристик технического состояния НТО.

Согласно общей схеме метода последовательного анализа вариантов с учетом указанной выше специфики рассмотрим адаптацию процедур анализа и отсеивания множеств возможных решений (подкомплектов и комплексов), а также конкретизируем правила вычисления допусков первого и второго уровней и сужения множеств возможных решений, учитывая специфику данной задачи.

При решении задачи на первом уровне определяются допуски первого уровня для множеств  $V_l$  вариантов подкомплектов  $v_{s_l}$ ,  $s_l \in S_l$ ,  $l \in L$  по ресурсам. На втором уровне задаются допуски по затратам ресурсов для множеств  $M_{jk}$  типов методов неразрушающего контроля.

Рассматриваемые ниже процедуры анализа и отсеивания вариантов комплексов и подкомплектов  $\Psi_1$  и  $\Psi_2$  состоят в вычислении и уточнении допусков первого и второго уровней. При этом исключаются:

- типы методов неразрушающего контроля  $m_{jl} \in M_{jk}$ , которые образуют различные подкомплекты  $V_{s_l}$  для измерения параметра технического состояния  $d_l$ , что приводит к сужению множеств  $V_{s_l}$  и, следовательно, сужению множеств  $V_l, l \in L$ ;
- возможные технологии  $S_l$  из множества возможных технологий  $S_l$  использования методов неразрушающего контроля для параметра технического состояния, что приводит к сужению множеств  $V_{s_l}$  и  $V_l, l \in L$ .

Пусть  $v^* = \arg \min_{v \in V} G_i(v), i \in I$

и  $H_{il} = \{h_{il} | h_{il} = g_{il}(v_{s_l}), v_{s_l} \in V_{s_l}\}, i \in I, l \in L$  – множество значений  $g_{il}(v_{s_l})$  – показателей затрат ресурсов на подкомплектах  $v_{s_l} \in V_{s_l}$ .

Поскольку величина

$$g_i^l = b_i - \min_{h_{il} \in H_{il}} G_i(g_{i1}(v_{s_1}^*), \dots, g_{il-1}(v_{s_{l-1}}^*), h_{il}, g_{il+1}(v_{s_{l+1}}^*), \dots, g_i(v_{s_l^*}^*)), i \in I \quad (3.5)$$

является допуском первого уровня для множества  $V_l$  по  $i$ -му ресурсу, то учитывая, что показатели затрат ресурсов  $G_i(v)$ ,  $i \in I$  аддитивно выражаются через характеристики методов неразрушающего контроля, рассмотрим следующие подсистемы ограничений, с помощью которых осуществляется анализ множеств  $V_l$  по допускам  $g_i^l$ , вычисленным в (3.5):

$$g_{il}(v_{s_l}) \leq g_i^l, \quad i \in I, \quad (3.6)$$

$$v_{s_l} \in V_l. \quad (3.7)$$

Пусть  $Q_l = \{g_i^l, i \in I\}$  – множество допусков подсистемы ограничений, а  $Q = \bigcup_{l \in L} Q_l$  – «система допусков». Множество допусков  $Q_l = \{g_i^l, i \in I\}$  предпочтительнее множества допусков  $Q_l' = \{g_i', i \in I\}$  (обозначим указанное предпочтение как  $Q \geq Q'$ ), если  $g_i^l \leq g_i'$  и хотя бы для одного  $i \in I$  неравенство строгое. Система допусков  $Q$  предпочтительнее системы допусков  $Q' = \bigcup_{l \in L} Q_l'$ , если хотя бы для одного  $l \in L$  предпочтение  $Q_l \geq Q_l'$  строгое.

Вычисление и улучшение системы допусков  $Q$  осуществляется процедурой  $\Psi_1$  за счет уточнения их значений при отсеивании элементов из множеств  $V_l$ .

На основе подсистем ограничений (3.6), (3.7) при анализе множеств  $M_{jl}$  по допускам второго уровня процедурой  $\Psi_2$  осуществляется:

- исключение  $m_{jk}$  типов методов неразрушающего контроля из множеств  $M_{jl}$ , которые не будут образовывать допустимых подкомплектов;
- исключение возможных технологий  $S_l$ , которые могут использоваться для построения допустимых и оптимальных подкомплектов методов неразрушающего контроля.

$$\text{Пусть } v_{s_l}^* = \arg \min_{v_{s_l} \in V_l} g_{il}(v_{s_l}), \quad i \in I,$$

где  $v_{s_l}^* = (m_{jk}^*)_{j \in s_l}$ .

Тогда величина

$$g_{ij}^l = g_i^l - \sum_{v \in s_l \setminus \{j\}} g_{il}(m_{vk}^*, d_l), \quad j \in J_l \quad (3.8)$$

является допуском второго уровня для множества типов методов неразрушающего контроля  $m_{jk} \in M_{jl}$  по  $i$ -му ограничению по ресурсам (3.7).

В то же время если  $g_{ij}^l$  является допуском (3.8), то в этом случае, если хотя бы для одного  $i \in I$  выполняется условие

$$g_{ij}(m_{jk}, d_l) > g_{ij}^l, \quad k \in K_j, \quad (3.9)$$

то  $k$ -я модификация  $m_{jk}$  методов неразрушающего контроля не может быть использована для построения подкомплекта  $V_{S_l}$ , который реализует технологию  $S_l$  и использует модификацию метода  $m_{jk}$ .

Из этого следует, что если неравенство (3.9) выполняется для всего множества  $M_{jl}$ , то есть из него исключены все методы  $m_{jk}$ , то из множества технологий  $S_l$  исключаются все технологии, которые используют методы неразрушающего контроля из множества модификаций  $M_{jl}$ .

Отметим, что в случае исключения всех технологий  $S_l$  из множества  $S_l$  параметр технического состояния  $d_l$  не может быть измерен существующим набором методов неразрушающего контроля с выделенными затратами по ресурсам.

Далее определим через  $M'_{jl}$ ,  $j \in J_l$  множество модификаций методов неразрушающего контроля, которые остались в множестве  $M_{jl}$  после проверки условий (3.9).

В этом случае число возможных вариантов построения подкомплектов для реализации технологии  $S_l$  при измерении параметра технического состояния  $d_l$  определяется:

$$|V'_{S_l}| = \prod_{j \in J_l} |M'_{jl}|,$$

а число всех возможных вариантов подкомплектов для измерения параметра технического состояния  $d_l$  определяется так:

$$|V_l'| = \sum_{s_l \in S_l'} |V_{s_l}'|,$$

где  $S_l' \subseteq S_l$ ,  $S_l'$  – множество технологий, которые остались во множестве  $S_l$  после проверки условий (3.9),  $|\cdot|$  – число элементов в соответствующем множестве.

Очевидно, что если хотя бы для одного  $l \in L$  множество  $V_l' = \emptyset$ , то исходная задача (3.1) ÷ (3.9) не имеет решения.

Если число  $|V_l'|, l \in L$  подкомплектов в множестве  $V_l', l \in L$  невелико (не превышает некоторого числа  $N_0$ , что задается с учетом вычислительных ресурсов компьютера и т. д.), то формируется и решается агрегированная задача  $A_{(0)}$ , которая рассматривается ниже. Оптимальное решение агрегированной задачи согласно общей схеме метода последовательного анализа вариантов является и оптимальным решением исходной задачи.

Если число элементов в множестве  $V_l', l \in L$  велико, то для продолжения поиска оптимального решения рассматривается следующее дополнительное ограничение на значение критерия (показателя полезности (эффективности) комплекса):

$$P_D(v) \geq P^*, \quad (3.10)$$



где величина  $P^*$  выбирается на отрезке  $[P_{\min}, P_{\max}]$ ,

$$P_{\min} = \min_{v \in V} P_D(v), P_{\max} = \max_{v \in V} P_D(v).$$

Отметим, что вероятность правильного измерения параметров технического состояния  $P_D(v)$  является монотонно возрастающей функцией от значений показателей вероятности правильного измерения параметров технического состояния подкомплексом  $P(v_{s_l})$ .

Представим  $P_D(v)$  в виде  $P_D(v) = P_D(p_1, \dots, p_l, \dots, p_{l^*})$ , где показатель качества комплекса  $P_D(p_1, \dots, p_{l^*})$  определяется на множестве  $\bigotimes_{l \in L} Hp_l(V_l)$ , где

$Hp_l(V_l) = \{p_l \mid p_l = P(v_{s_l}), v_{s_l} \in V_{s_l}, s_l \in S_l, l \in L -$   
упорядоченное множество значений  $P(v_{s_l})$ .

Пусть

$$\tilde{p}_l = \max_{v_{s_l} \in V_l} P(v_{s_l}), l \in L,$$

тогда допуски первого и второго уровней по ограничению на вероятность правильного измерения параметра технического состояния  $d_l$  определяются на основе следующих положений.

Во-первых, величина

$$p_l^* = \min_{p_l \in H_{p_l}(V_l)} P(\tilde{p}_1, \dots, \tilde{p}_{l-1}, p_l, \tilde{p}_{l+1}, \dots, \tilde{p}_{l^*}) \geq P^* \quad (3.11)$$

является допуском первого уровня для множества  $V_l$  по вероятности правильного измерения параметра технического состояния  $d_l$ .

К подсистеме ограничений (3.6), (3.7) с множеством допусков  $Q_l$  добавим следующее требование по вероятности правильного измерения параметра технического состояния:

$$P(v_{s_l}) \geq p_l^* . \quad (3.12)$$

Тогда  $\bar{Q} = \bigcup_{l \in L} \bar{Q}_l$  – полная система допусков подсистемы ограничений (3.6), (3.7), (3.12) с множеством допусков  $\bar{Q}_l = Q_l \cup \{p_l^*\}$ ,  $l \in L$ .

Используя допуски  $\bar{Q}$  подсистемы ограничений (3.6), (3.7), (3.12), дальнейший анализ множеств  $M_{jl}$  и исключение из них элементов можно выполнить с помощью процедуры  $\Psi_2$ .

Во-вторых, пусть  $p_l^*$  – допуск (3.12), тогда величина

$$p_{lj}^* = \lg(1 - p_l^*) - \sum_{v \in S_l \setminus \{j\}} \lg(1 - p_v(m_{jk}, d_l)) \quad (3.13)$$

является допуском второго уровня для множеств элементов  $M_{jl}$  по вероятности правильного измерения параметра технического состояния.

В-третьих, пусть  $p_{lj}^*$  – допуск (3.13). Если

$$\lg(1 - p_l(m_{jk}, d_l)) > p_{lj}^* , \quad (3.14)$$

то элемент  $m_{jk}$   $k$ -го типа не используется для построения подкомплектов  $V_{s_l}$ , которые реализуют  $S_l$ -ю технологию для измерения параметра технического состояния  $d_l$ .

Тогда если в результате проверки условий (3.12, 3.14) множество  $M_{jl} = \emptyset$ , то технологии  $S_l$ , которые используют методы неразрушающего контроля из множества  $M_{jl}$ , исключаются из множества  $S_l$  и дальнейшего рассмотрения.

Таким образом, в результате использования процедуры  $\Psi_2$  для отсева неконкурентоспособных по показателю вероятности правильного измерения параметров технического состояния вариантов комплексов получим множество  $V'$ . Оно будет таким, что  $V' \subseteq V$  и в дальнейшем исследуется на предмет наличия в нем оптимальных вариантов комплексов.

Процедура  $\Psi_2$  при анализе вариантов  $V_{S_l}$  может быть изложена следующим образом.

Во-первых, полагаем  $M_{jl}^{(0)} = M_{jl}$ ,  $l \in L, v = 0$ .

Далее вычисляем допуски

$g_{ij}^{l^{(v-1)}}$ ,  $i \in I, j \in J_l, S_l \in S_l^{(v-1)}$  по формуле (3.8). В результате проверки условий (3.9) получим множество

$$M_{jl}^{(v-1)}, S_l^{(v-1)} \quad j \in J_l, l \in L.$$

Затем, если множество  $S_l^{(v-1)} = \emptyset$ , то заканчиваем вычисления. После чего вычисляем допуски  $p_l^{*(v-1)}, l \in L$  по формуле (3.11). В результате проверки условий (3.14) получим множества  $M_{jl}^{(v)}, S_l^{(v)}$ ,  $j \in J_l, l \in L$ . Если  $S_l^{(v)} = \emptyset$ , то заканчиваем вычисления. В том случае если

$$M_{jl}^{(v)} = M_{jl}^{(v-1)}, S_l^{(v)} = S_l^{(v-1)}, \quad (3.15)$$

заканчиваем вычисления, иначе переходим к шагу 1, полагая  $\nu = \nu + 1$ .

Следует отметить, что выполнение равенств (3.15) в процедуре  $\Psi_2$  эквивалентно равенству  $V_l^{(\nu)} = V_l^{(\nu-1)}$ , где  $V_l^{(\nu)}$  – множество подкомплектов, полученное после  $\nu$  итераций. Очевидно, что  $V_l^{(\nu)} \subseteq V_l$  ( $V_l^{(0)} = V_l$ ),  $l \in L$ .

Сужение множеств  $V_l$ ,  $l \in L$  может привести к улучшению полной системы допусков  $\bar{Q}$ . Пересчет полной системы допусков  $\bar{Q}$  осуществляется процедурой  $\Psi_1$ .

Вначале полагаем  $V_l^{(0)} \subseteq V_l$ ,  $l \in L$ ,  $V^{(0)} = \bigotimes_{l \in L} V_l^{(0)}$ .

Определяем на множестве  $V^{(0)}$  систему допусков  $\bar{Q}^{(0)} = \bigcup_{l \in L} \bar{Q}_l^{(0)}$ ,  $\bar{Q}_l^{(0)} = Q_l^{(0)} \cup \{p_l^{*(0)}\}$ ,  $Q^{(0)} = \{g_i^{l(0)}\}$   $l \in L$ ,

где допуски  $g_i^{l(0)}$  и  $p_l^{*(0)}$  вычисляются по формулам (3.5), (3.11). Затем применяем к подсистемам ограниченный вид (3.6), (3.7), (3.12) с допусками  $\bar{Q}_l^{(\nu-1)}$ ,  $l \in L$  процедуру  $\Psi_2$ . Определяем новую систему допусков

$\bar{Q}^{(\nu)} = \bigcup_{l \in L} \bar{Q}_l^{(\nu)}$ , где допуски  $g_{ij}^{l(\nu)}$  и  $p_{lj}^{(\nu)}$  вычисляются

соответственно по формулам (3.8), (3.13). Далее если  $\bar{Q}^{(\nu)} = \bar{Q}^{(\nu-1)}$ , то заканчиваем вычисления. В случае  $\bar{Q}^{(\nu)} \geq \bar{Q}^{(\nu-1)}$  полагаем  $\nu = \nu + 1$  и повторяем процедуру.

На основе вышеизложенных процедур приведем формальный алгоритм решения поставленной задачи (3.1)÷( 3.3), который состоит из следующих шагов.

На множестве  $V$  применяем процедуру  $\Psi_1$ . Получаем множество  $V^{(0)} = \prod_{l \in L} V_l^{(0)}$  и систему допусков

$$\overline{Q}^{(0)} = \bigcup_{l \in L} \overline{Q}_l^{(0)}.$$

Если число вариантов комплексов в множестве  $V^{(0)}$  невелико (на практике  $|V^{(0)}| < N_{(0)}$ , где величина  $N_0 = 10^3 - 10^5$ ), то решаем задачу (3.1) ÷ (3.3) прямым перебором вариантов множества  $V^{(0)}$ . Иначе, если  $\sum_{l \in L} |V_l^{(0)}| > N_1$ , то полагаем

$$P_{\min} = \min_{v_{s_l} \in V^{(0)}} P(v_{s_l}), \quad P_{\max} = \max_{v_{s_l} \in V^{(0)}} P(v_{s_l}),$$

$$\gamma = 1, \quad P_*^{(\gamma)} = (P_{\min} + P_{\max}) / 2$$

и, оценивая условие  $\overline{Q}^{(\nu)} = \overline{Q}^{(\nu-1)}$ , заканчиваем вычисления, а в случае  $\overline{Q}^{(\nu)} \geq \overline{Q}^{(\nu-1)}$  полагаем  $\nu = \nu + 1$  и повторяем вычисления.

Величина  $N_1$  задается с учетом располагаемых вычислительных ресурсов и выражает размерности для таблиц данных, необходимых для явного формирования агрегированной задачи.

Если  $\sum_{l \in L} |V_l^{(0)}| \leq N_1$ , то прямым перебором вари-

антов во множествах  $V_l^{(0)}$  осуществляем отсеивание

подкомплектов, не удовлетворяющих допускам  $\overline{Q}_l^{(0)}$ , и на множествах допустимых вариантов  $V_l^{(0)}$ , вычисляя в явном виде значения показателей (3.1), (3.9) на этих подкомплектах, формируем следующую агрегированную задачу дискретного монотонного программирования (задачу  $A_{(0)}$ ) [111]:

$$P_D(z) = \max_{z \in Z^{(0)}} \{P_D(p_1(z_{1k_1}), \dots, p_l(z_{lk_l}), \dots, p_{l^*}(z_{l^*k_{l^*}}))\}$$

при ограничениях на ресурсы

$$g_i(z) = \sum_{l \in L} g_{il}(z_{lk_l}) \leq b_i, i \in I,$$

$$z = (z_{1k_1}, \dots, z_{lk_l}, \dots, z_{l^*k_{l^*}}) \in Z^{(0)} = \prod_{l \in J} Z_l^{(0)}.$$

Здесь  $Z_l^{(0)} = \{z_{l1}, \dots, z_{lk}, \dots, z_{lk_l}\}$  – конечное множество подкомплектов для измерения параметра технического состояния  $d_l$ , которые удовлетворяют подсистемам ограничений (3.6), (3.7), (3.12) с допусками  $\overline{Q}_l^{(0)}$ .

Если  $|Z^{(0)}| < N_0$ , то решаем задачу  $A_{(0)}$  прямым перебором вариантов, что может быть наиболее эффективно с вычислительной точки зрения.

Если  $|Z^{(0)}| > N_0$ , то для решения задачи используем известные методы дискретной оптимизации, в частности, может быть использован алгоритм последовательного анализа вариантов, изложенный в [111].

Если в результате решения задачи  $A_{(0)}$  получен ее оптимальный вариант  $z^* = (z_1^*, \dots, z_l^*, \dots, z_l^*)$ , то, выбирая подкомплект  $v_{s_l} \in V_l^{(0)}$ , соответствующий компоненте  $z_l^*$ , получаем оптимальное решение задачи (3.1)-(3.3).

Если решение задачи  $A_{(0)}$  сложно (параметр  $N_1$  задан достаточно большим, или решение задачи ограничено по времени), то полагаем  $\gamma = 1$ ,  $P_*^{(\gamma)} = (P_{\min} + P_{\max})/2$  и, оценивая условие  $\overline{Q}^{(\nu)} = \overline{Q}^{(\nu-1)}$ , заканчиваем вычисления, а в случае  $\overline{Q}^{(\nu)} \geq \overline{Q}^{(\nu-1)}$  полагаем  $\nu = \nu + 1$  и повторяем вычисления.

Если хотя бы для одного  $l \in L$  множество  $Z_l^{(0)} = \emptyset$  или задача  $A_{(0)}$  не имеет решения, то исходная задача не имеет решения.

Далее подставляем значение  $P_*^{(\gamma)}$  в ограничение (3.10) и применяем процедуру  $\Psi_1$ . Таким образом, получаем новую систему допусков  $\overline{Q}^{(\gamma)}$  и множество вариантов комплексов  $V^{(\gamma)} = \bigotimes_{l \in L} V_l^{(\gamma)}$ .

При таком алгоритме возможны следующие исходы:

1. Множество  $V^{(\gamma)} = \emptyset$ , тогда вычисляем допуски  $p_l^{*(\nu-1)}, l \in L$  по формуле (3.11). В результате

проверки условий (3.14) получим множества  $M_{jl}^{(v)}, S_l^{(v)}, j \in J_l, l \in L$ .

$$2. \sum_{l \in L} |V_l^{(\gamma)}| \leq N_1. \text{ При полученных допусках } \overline{Q}^{(\gamma)}$$

на множестве  $V^{(\gamma)}$  явным образом формируем агрегированную задачу  $A_{(\gamma)}$ , аналогичную задаче  $A_{(0)}$ . В результате решения задачи  $A_{(\gamma)}$  возможны следующие случаи.

Получен  $Z'$  - оптимальный вариант задачи  $A_{(\gamma)}$ .

Вариант  $Z'$  проверяем на оптимальность с помощью критериев оптимальности 2 и 3 [111]. Если критерии оптимальности не выполняются, то есть допустимое решение не оптимально, то  $Z'$  считается приближенным решением задачи  $A_{(\gamma)}$  с оценкой относительной погрешности  $\theta$ , равной

$$\frac{P(z^*) - P(z)}{P(z^*)} * 100\% \leq \frac{P^{(\gamma)} - P(z)}{P^{(\gamma)}} * 100\% = \theta,$$

где  $z^*$  – оптимальное решение.

Если  $z^*$  оптимальное или приемлемо приближенное решение исходной задачи, то заканчиваем вычисления по алгоритму. Иначе, полагаем

$$P_{\min} = P_D(z'), P^{(\gamma+1)} = P_{\min}, \gamma = \gamma + 1,$$

и если множество  $S_l^{(v-1)} = \emptyset$ , то заканчиваем вычисления.



Если задача  $A_{(\gamma)}$  не имеет допустимых решений, то вычисляем допуски  $p_l^{*(v-1)}, l \in L$  по формуле (3.11). В результате проверки условий (3.14) получим множества  $M_{jl}^{(v)}, S_l^{(v)}, j \in J_l, l \in L$ .

В случае, когда решение задачи  $A_{(\gamma)}$  связано с большими вычислительными трудностями, оцениваем выполнение условия  $S_l^{(v)} = \emptyset$  и заканчиваем вычисления.

Из общей схемы метода последовательного анализа вариантов и обоснования процедур  $\Psi_1$  и  $\Psi_2$  следует, что если задача  $A_{(\gamma)}$  не имеет допустимых вариантов или полученное множество  $Z^{(\gamma)} = \emptyset$ , то допустимый вариант  $V'$  задачи удовлетворяет условию  $P(v') \leq P_*^{(\gamma)}$ .

На основе анализа данных, которые характеризуют агрегированную задачу, можно наперед предусмотреть, что из-за большой комбинаторной размерности ее решение может быть усложнено. В этом случае целесообразно усилить ограничение (3.10), не решая задачи  $A_{(\gamma)}$ .

Далее оцениваем выполнение условия  $\sum_{l \in L} |V_l^{(\gamma)}| > N_1$ . Во множестве  $V^{(\gamma)}$  находим вариант комплекса  $\bar{v} = \arg \max_{v \in V^{(\gamma)}} P_D(v)$  и проверяем его на оп-

тимальность по критерию оптимальности 1 [111]. Если критерий оптимальности 1 не выполняется, то заканчиваем вычисления.

При нахождении возможного варианта комплекса  $v'$  для проверки на оптимальность по критерию оптимальности 1 [111] агрегированная задача  $A_{(\gamma)}$  не формулируется независимо от ее размерности.

Уменьшаем значение  $P_*^{(\gamma)}$ , полагая

$$P_*^{(\gamma+1)} = (P_{\min} + P_*^{(\gamma)}) / 2, \quad P_{\max}^{(\gamma)} = P_*^{(\gamma)},$$

и при  $\gamma = \gamma + 1$  переходим к определению значения  $P_*^{(\gamma)}$  и применяем процедуру  $\Psi_1$ . Таким образом, получаем новую систему допусков  $\overline{Q}^{(\gamma)}$  и множество вариантов комплексов  $V^{(\gamma)} = \bigotimes_{l \in L} V_l^{(\gamma)}$ .

Затем увеличиваем значение  $P_*^{(\gamma)}$ , полагая

$$P_*^{(\gamma+1)} = (P_{\min} + P_*^{(\gamma)}) / 2, \quad \gamma = \gamma + 1,$$

снова определяем множество вариантов комплексов и проверяем условие

$$P_*^{(\gamma+1)} - P_*^{(\gamma)} > \varepsilon_1,$$

где  $\varepsilon_1 \geq \varepsilon_0$ ,  $\varepsilon_0$  – некоторая положительная величина, которая задается с учетом ошибок округления, точности вычислений и т. д. Например,  $\varepsilon_0$  может быть выбрано с учетом величины

$$\varepsilon' = \min_{l, k \in L} |P(v_{s_l}) - P(v_{s_k})|,$$

$$P(v_{s_l}) \neq P(v_{s_k}).$$

Если  $\left| P_*^{(\gamma+1)} - P_*^{(\gamma)} \right| \leq \varepsilon_1$ , где  $\varepsilon_1 \geq \varepsilon_0$ ,  $\varepsilon_0$  достаточно мало, но  $\left| V^{(\gamma)} \right| > N_0$  и  $\sum_{l \in L} \left| V_l^{(\gamma)} \right| > N_1$ , то увеличиваем параметры  $N_0, N_1$  или ограничиваемся нахождением приближенных вариантов комплексов, вычисляя для них оценки относительной погрешности  $\theta$ , и выбираем комплекс, который имеет наилучшую оценку.

Рассмотренная задача (3.1)÷(3.3) и алгоритм ее решения могут применяться при построении оптимальных методов для различных объектов контроля: как НТО ТК и СК в целом, так и отдельных агрегатов и элементов этих комплексов.

#### **3.4. Оценивание технического состояния технологического оборудования технических и стартовых комплексов. Показатель работоспособности технологического оборудования технических и стартовых комплексов**

В соответствии с положениями работы [116] недостаток оценивания работоспособности технических устройств по выборочным характеристикам содержит то обстоятельство, что статистика как наука обращена в прошлое, ибо свои выводы она делает на основе уже свершившихся событий. А надежность, на базе которой рассчитывается ресурс и оценивается работоспособность оборудования, – это наука о будущем, о том, что может произойти с оборудованием, в настоящее время нас удовлетворяющим.

Для критичных объектов, которыми являются агрегаты и системы механической компоненты НТО ТК и

СК [117], единственно возможным направлением получения приемлемых по точности и достоверности оценок работоспособности является снятие априорной неопределенности знаний закономерностей изменения внутренних параметров объекта, характеризующих фактический запас его долговечности в конкретных условиях эксплуатации. Такой подход позволяет отойти от представления об объекте как о «черном ящике», что характерно для статистического подхода. Методологической основой решения проблемы оценивания работоспособности должно быть глубокое проникновение в физику процессов расходования работоспособности объектов эксплуатации (анализ физики отказов).

Сущность физического подхода заключается в выявлении и описании устойчивых необратимых закономерностей изменения внутренних свойств материалов и внешних форм элементов объекта под воздействием дестабилизирующих факторов как внутренней природы, заложенных при проектировании, так и внешней природы, зависящих от условий эксплуатации. При таком подходе должно быть выявлено достаточное множество определяющих параметров, характеризующих эти изменения и доступных для инструментального (приборного) контроля в процессе эксплуатации, а также построены формализованные модели взаимодействия этих параметров, записанные в виде показателей работоспособности объекта.

Преимущества физического подхода перед статистическим заключаются:

во-первых, в принципиальной возможности индивидуального прогнозирования наступления предельного состояния объекта до фактического исчерпания ресурса;

во-вторых, в существенном снижении степени неопределенности информации о показателях работоспособности объекта.

В данном случае осуществляется переход от неопределенности знаний характеристик работоспособности группы объектов в широком спектре условий эксплуатации к определенности знаний характеристик работоспособности конкретного объекта в конкретных условиях эксплуатации. Однако неопределенность знаний в последнем случае не устранима полностью, потому что, как правило, остается не полностью определенным весь перечень физико-химических процессов старения (деградации) и усталостной деформации материалов, а также изнашивания узлов и деталей. При таком подходе не полностью определен вектор дестабилизирующего воздействия, не известен механизм детального взаимодействия различных процессов деградации, ограничен интервал наблюдения за определяющими параметрами, возможны ошибки измерения параметров, ограничена точность приборов контроля.

Реализация физического подхода требует решения ряда методических и теоретических задач:

1. Выявление перечня объектов НТО ТК и СК, для которых физический подход оценивания ресурса является приемлемым.
2. Выявление множества контролируемых параметров с формированием перечня определяющих параметров.
3. Формирование соотношения для полного набора частных показателей расходования и пополнения работоспособности агрегатов НТО ТК и СК.
4. Формирование соотношения для интегрального показателя расходования и пополнения работоспособности.

Целесообразность использования физического подхода особенно высока для невосстанавливаемых объектов с высокой ценой отказа, состоящих из ограниченного числа элементов с возможностью доступа к ним для проведения неразрушающего приборного контроля. К таким объектам из состава НТО ТК и СК относятся элементы, узлы и агрегаты пускового, установочного и подъемно-перегрузочного оборудования, а также средств обслуживания РКН.

С точки зрения границ использования данного подхода в пределах различных иерархических уровней сложных систем физический подход в наилучшей степени приемлем для уровней «материал – элемент – функциональное устройство (узел)».

В современной литературе, в частности в [118], выделяют следующие особенности физического моделирования процессов деградации для рассматриваемых уровней.

Во-первых, изучение закономерностей изменения свойств и состояний конструкционных материалов, проводимое на трех уровнях: субмикроскопическом, микроскопическом и макроскопическом. Использование субмикроскопического уровня (строения атомов, молекул, кристаллических решеток) позволило получить представление о дислокациях в кристаллах, их взаимодействии и движении, о диффузии атомов и электронном состоянии твёрдых тел и т.д. Эти сведения легли в основу решения многих задач теории прочности конструкционных материалов. На микроскопическом уровне рассматриваются процессы в небольших объемах (зерна, границы зёрен, термические превращения). Макроскопический уровень связан с исследованием распространения закономерностей, полученных на микроуровне, на весь объем твердого тела. Это потребовало разработки специальных методов инженерных расчетов, например расчетов сложного напряженного состояния тел, износа, деформации и т.д.

Во-вторых, основными физико-химическими процессами, которые в литературе по физике отказов считаются ответственными за изменение физических свойств материа-

лов и, как следствие, за изменение функциональных характеристик объектов элементов, являются следующие: диффузия, химические процессы, адсорбция, распад твердых растворов, изменение механических, электрических и магнитных свойств твердых тел.

Эти процессы являются причиной более сложных деградационных макропроцессов: коррозии, эрозии, износа, теплового старения, высокоцикловой и малоцикловой усталости, ползучести, деформаций. Причем эти процессы развиваются под воздействием комплекса эксплуатационных факторов, таких как: динамические и статические механические нагрузки, термогидравлические и тепловые удары, взаимодействие теплоносителя с конструктивными элементами, перенос и осаждение продуктов коррозии, примесей и т. д.

Изменения в материалах на макроскопическом уровне влияют на техническое состояние элементов оборудования НТО ТК и СК и, как следствие, на изменение их выходных параметров во времени, что, в свою очередь, обуславливает накопление постепенных изменений на следующем иерархическом уровне (уровне функциональных узлов).

При физико-статистическом моделировании процессов деградации основной методологической схемой является дуальная модель «параметр – поле допуска». Расширяя понятия «параметр» и «поле допуска», можно практически все модели, существующие в рамках физико-статистического подхода, представить данной схемой (например, модель «нагрузка – несущая способность»).

Центральной проблемой физико-статистического моделирования является выбор оптимальной совокупности определяющих параметров объектов, удовлетворяющих условию возможности инструментального контроля, научно обоснованное назначение границ полей допусков для них и построение математических моделей, позволяющих спрогнозировать значения параметров вероятностных распределений, характеризующих возможность пересечения установленных пределов измерения в будущие моменты времени.

Исходя из того что объективно существуют соотношения для оценивания фактической работоспособности объектов НТО ТК и СК, а также характера ее расходования в процессе эксплуатации, представляется возможность введения показателя работоспособности объектов НТО ТК и СК в виде убывающей функции от времени.

Результаты работ [119 ÷ 123] показывают, что на всех уровнях детализации, от субмикроскопического до макроскопического, процессы потери работоспособности описываются экспоненциальной зависимостью.

Поэтому, используя экспоненту как функциюобразующую зависимость, можно построить общий показатель для оценивания работоспособности НТО ТК и СК в виде:

$$P_{\text{работоспособн}} = \frac{t_{\text{ост}}}{t_r} = \exp(\text{определяющие параметры}), \quad (3.16)$$

где  $t_{\text{ост}}$  – время остаточного ресурса,  $t_r$  – время абсолютного ресурса,

и соответствующую функцию изменения показателя

$$\frac{dP_{\text{работ}}}{dt} = -(\text{функция} \cdot \text{параметров}) P_{\text{работ}}, \quad (3.17)$$

по которой скорость изменения работоспособности снижается во времени пропорционально её текущему значению. Если ввести функцию повреждаемости (деградации) как  $D = 1 - P_{\text{работ}}$ , то соотношение (3.17) будет показывать, что повреждаемость объекта растет пропорционально уровню повреждения.

Таким образом, процедура формирования соотношения для показателя работоспособности должна содержать следующие этапы:

1. Выявление множества факторов, влияющих на снижение работоспособности НТО ТК и СК.

2. Синтез выражения для общего показателя работоспособности НТО ТК и СК.



3. Преобразование выражения для общего показателя работоспособности в набор частных показателей (по видам оборудования, по агрегатам и т. д.).

Из изложенного выше следует, что в монографии представлен алгоритм формирования показателя работоспособности НТО ТК и СК. Алгоритм выявления определяющих параметров для показателя работоспособности иллюстрирует рис. 3.11.

Процедура, описанная в пункте 3.3, выявила в качестве центральной информации по вопросам работоспособности следующие определяющие параметры:

- 1)  $W$  – технологичность (энергетический КПД) [–];
- 2)  $HВ$  ( $HRC_3$ ) – твердость конструкционного материала  $\left[ \frac{H}{M^2} \right]$ ;
- 3)  $\Delta P$  – уровень акустического излучения  $\left[ \frac{H}{M^2} \right]$ ;
- 4)  $\delta$  – фактическое значение толщин (силовых) конструкций [м];
- 5)  $t_\phi$  – фактическое время работы [с];
- 6)  $v$  – характерные скорости рабочих процессов (возможно, виброскорости)  $\left[ \frac{M}{c} \right]$ ;
- 7)  $T_r$  – температура фактическая [ $K^0$ ];
- 8)  $T_0$  – рабочая температура [ $K^0$ ].

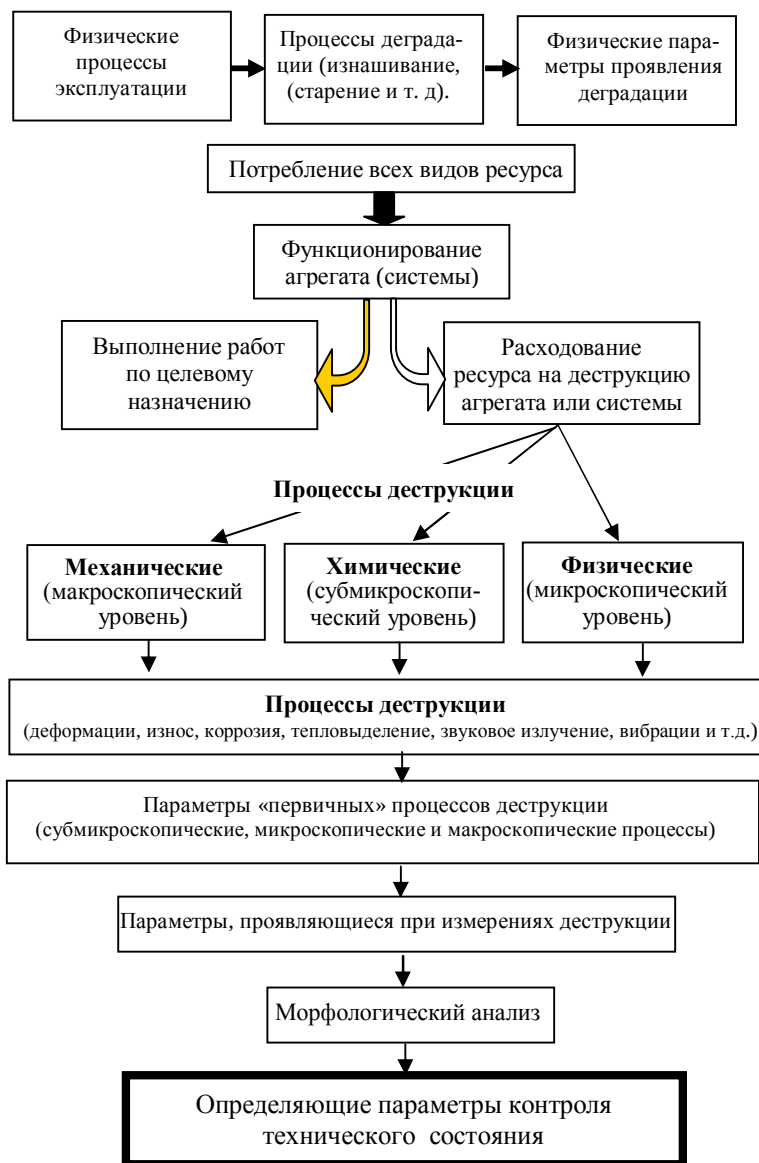


Рис. 3.11. Алгоритм выявления определяющих параметров

Таким образом, мы имеем множество ( $M$ ) определяющих параметров, строго полученное на основании имеющегося банка научных и технических данных о деградации НТО ТК и СК. Эта совокупность параметров является аргументом для показателя работоспособности

$$P_{\text{раб}} = \frac{t_{\text{осм}}}{t_r} = \exp(M).$$

С указанным здесь множеством необходимо провести некую операцию трансформации определяющих параметров в функцию деградации ( $Y$ ), имеющую нулевую размерность. Для этой функции определены лишь аргументы

$$Y_{\text{деградации}} = f(W, HB, \Delta P, \delta, t_\phi, v, T_r, T_0).$$

Положения анализа размерностей, описанные выше, позволяют записать

$$Y_{\text{дегр}} = \frac{1}{W} \cdot \frac{\Delta P}{HB} \cdot \frac{T_r}{T_0} \cdot \frac{t_\phi^v}{\delta},$$

тогда можно синтезировать выражение для показателя долговечности в виде:

$$P_{\text{работ}} = \frac{t_{\text{осм}}}{t_r} = \exp \left( -const \cdot \frac{1}{W} \cdot \frac{\Delta P}{HB} \cdot \frac{T_r}{T_0} \cdot \frac{t_\phi^v}{\delta} \right). \quad (3.18)$$

Частные выражения для показателей работоспособности должны быть разработаны для уникальных объектов НТО СК с учетом их индивидуальных особенностей.

Так, для гидравлического оборудования НТО СК может быть использовано соотношение для оценивания работоспособности насоса объемного действия. Применительно к насосу типа Н 400, установленному на агрегате обслуживания 11У211, процедуры морфологиче-

ского анализа позволили получить следующие определяющие параметры:

- 1)  $c$  – жесткость пружин в насосе  $\left[\frac{H}{M}\right]$ ;
- 2)  $s$  – зазор в плунжерных парах  $[M]$ ;
- 3)  $e$  – эксцентриситет в насосе  $[M]$ ;
- 4)  $t$  – время работы насоса  $[c]$ ;
- 5)  $f$  – частота вращения вала привода  $[Гц]$ ;
- 6)  $P_{ПК}$  – давление настройки предохранительного клапана  $[Па]$ .

Анализ размерностей позволил найти зависимости между физическими величинами, влияющими на работоспособность гидравлических машин.

Согласно ранее принятому подходу выражение для показателя работоспособности примет вид

$$P_{работ} = \frac{t_{осм}}{t_r} = \exp \left( -const \cdot \frac{s^2 \cdot P_{ПК}}{e \cdot c} \cdot f \cdot t \right). \quad (3.19)$$

Для механических приводов НТО ТК и СК, построенных на зубчатом зацеплении с прямозубыми эвольвентными колесами, показатель работоспособности имеет вид

$$P_{работ} = \frac{t_{осм}}{t_r} = \exp \left( -const \cdot \frac{\Delta P}{HB^2 \cdot V} \cdot (\Delta f \cdot t) \cdot \left( \frac{1}{z} \right) \right), \quad (3.20)$$

где

- 1) уровень акустического излучения при работе редуктора –  $\Delta P \left[ \frac{H}{M^2} \right]$ ;
- 2) твердость материала колеса (по Бринеллю) –  $HB \left[ \frac{H}{M^2} \right]$ ;

- 3) амплитуда изменения частоты вращения колеса –  $\Delta f \left[ \frac{1}{c} \right]$ ;
- 4) величина передаваемого зубчатой парой рабочего момента –  $M$  [Н·м];
- 5) геометрический фактор колеса (диаметры вершин, впадин, основной делительной окружности) выражается через модуль зацепления ( $m$  [мм]), являющийся гостированной величиной, и число зубьев колеса ( $z$  [ - ]). Таким образом, можно полагать, что геометрический фактор допустимо представить безразмерной величиной числа зубьев колеса –  $z$ ;
- 6) время работы зубчатой пары –  $t$  [с].

Результаты, представленные в настоящем разделе, позволяют сделать следующие выводы:

1. Выполненный анализ информационно-технического обеспечения процессов безопасности функционирования НТО ТК и СК показывает, что во многих случаях отсутствие единых требований и условий сбора информации, а также регулярного, хорошо организованного учета и отчетности приводит к получению случайных данных, не отражающих реального положения дел. Из-за перегруженности работников КРК вычислительными работами допускаются ошибки в расчетах, а затем и в принимаемых решениях. Практические нужды КРК в настоящее время вызывают необходимость в создании интегрированных информационных систем в виде КУБ, приспособленных не к структуре установившихся взаимосвязей и подчинения, а к про-

цессу комплексного решения проблем обеспечения безопасности НТО ТК и СК. При таком подходе КУБ не будет относиться только к компетенции одного подразделения, а будет оказывать разностороннее воздействие на КРК в целом, нарушая традиционно сложившуюся структуру, стирая грани между функциональным и линейным руководством. В этих условиях на первый план выдвигается определение относительной важности различных центров принятия решений в КРК и необходимой в каждом случае информации, а также установления каналов ее получения.

2. Управление безопасностью НТО ТК и СК следует организовывать через оценивание технического состояния НТО СК и ТК. Такое оценивание следует проводить не после исчерпания назначенного ресурса, а в течение всего жизненного цикла СК, т. е. начиная с разработки концепции создания СК и формулировки требований к техническим и организационно-методическим средствам контроля технического состояния и продолжая при обосновании физических принципов функционирования и технологий подготовки РКН к пуску и контролю технического состояния, при проектировании оборудования и средств контроля, при обосновании организационно-технической структуры систем эксплуатации СК и КУБ.

3. Система сбора информации о безопасности НТО ТК и СК должна быть построена на основе системы функционального мониторинга технического состояния НТО. Система функционального мониторинга представляет собой автоматизированную систему контроля и диагностики технического состояния НТО ТК и СК и является одним из компонентов КУБ.

4. В процессе функционирования наземный комплекс КРК может находиться в различных функциональных состояниях, в каждом из которых при функциональном мониторинге следует оценивать техническое состояние. Перечисление функциональных состояний НТО ТК и СК и их характеристик как объектов мониторинга целесообразно проводить на основе анализа их структуры, функциональных состояний, алгоритмов, стационарных и переходных процессов функционирования. Целью анализа объектов функционального мониторинга является построение формализованной диагностической модели, на основе которой формируется множество характеристик, контролируемых в процессе функционального мониторинга, и обосновывается достаточность этих характеристик для полного контроля технического состояния НТО ТК и СК. Источником информации для построения диагностической модели должен быть рабочий проект наземного комплекса КРК, откуда выявляются исходные данные для анализа, включающие технические описания объектов НТО и инструкции по эксплуатации объектов мониторинга. Наиболее важным следствием анализа объектов функционального мониторинга является возможность перечисления конкретных вариантов перехода НТО в неисправные (предельные) состояния. Диагностические модели в системах функционального мониторинга должны отражать, во-первых, функциональные состояния, реализующиеся в процессе штатного функционирования объектов мониторинга, и, во-вторых, функциональные состояния, позволяющие выполнить их идентификацию.

5. Предложенные методологические принципы и математические модели позволяют решать задачу обоснования достаточности и необходимости информации о безопасности функционирования для конкретных объектов НТО ТК и СК. Формирование множества характеристик объектов мониторинга, необходимых и достаточных для оценивания контролируемости и различимости технических состояний, позволяет формулировать и решать задачи обоснования технологий, методов и средств контроля технического состояния НТО ТК и СК. С этой целью каждой из групп оборудования можно поставить в соответствие множество технологий (методов) неразрушающего контроля и номенклатуру технических средств для реализации этих методов. Выбор метода контроля основывается помимо априорного знания о характере неисправностей на учете таких факторов, как условия работы, форма и размеры, физические свойства материала, условия контроля и возможность монтажа технического средства без снижения эффективности штатной работы. Анализ различных методов при проведении мониторинга показал целесообразность применения комплексных систем контроля, которые используют разные по физической природе методы исследования, что позволяет реализовать тем самым принцип «избыточности» для контроля параметров технического состояния элементов НТО. Результаты решения задачи обоснования достаточности и необходимости информации о безопасности функционирования для конкретных объектов НТО ТК и СК могут применяться при построении оптимальных методов для различных объектов контроля: как НТО ТК и СК в целом, так и отдельных агрегатов и элементов этих комплексов.



6. Для критичных объектов, которыми являются агрегаты и системы НТО ТК и СК, единственным возможным направлением получения приемлемых по точности и достоверности оценок работоспособности является снятие априорной неопределенности знаний закономерностей изменения внутренних параметров объекта, характеризующих фактический запас его долговечности в конкретных условиях эксплуатации. Такой подход позволяет отойти от представления об объекте как о «черном ящике», что характерно для статистического подхода. Методологической основой решения проблемы оценивания работоспособности должно быть глубокое проникновение в физику процессов расходования технического ресурса объектов НТО в процессе их эксплуатации. Целесообразность использования физического подхода особенно высока для невозвращаемых объектов с высокой ценой отказа, состоящих из ограниченного числа элементов с возможностью доступа к ним для проведения неразрушающего приборного контроля. Центральной проблемой физико-статистического моделирования является выбор оптимальной совокупности определяющих параметров объектов, удовлетворяющих условию возможности инструментального контроля, научно обоснованное назначение границ полей допусков для них и построение математических моделей, позволяющих спрогнозировать значения параметров вероятностных распределений, характеризующих возможность пересечения установленных пределов измерения в будущие моменты времени.

#### **IV. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ И СТАРТОВЫХ КОМПЛЕКСОВ**

Основываясь на положениях, представленных в 1-м и 2-м разделах настоящей монографии, можно утверждать, что процесс управления безопасностью НТО ТК и СК имеет три компонента: обслуживающий персонал, технические средства наземной инфраструктуры КРК и информацию о состоянии средств наземной инфраструктуры КРК.

Обслуживающий персонал является, с одной стороны, объектом безопасности, который следует оградить от воздействия опасных факторов. С другой стороны, обслуживающий персонал является предметом безопасности процессов функционирования НТО ТК и СК, способным вызвать появление и развитие опасных факторов. С третьей стороны, обслуживающий персонал является элементом системы, управляющей безопасностью на комплексе.

Технические средства также в свою очередь представляют собой объект безопасности, который следует сохранить в процессе эксплуатации НТО ТК и СК, а также предмет безопасности – источник появления опасных факторов. Причем следует отметить, что эти воззрения о технических средствах в полной мере относятся как к технологическому оборудованию, так и к техническим средствам КУБ.

И наконец, информационный компонент также многолик. Он отражает текущее техническое состояние НТО ТК и СК, ход выполнения технологического процесса подготовки и проведения пуска РКН, а также выполняет оценивания опасных ситуаций на комплексе.

Признавая существование жесткой корреляции между описанными выше компонентами в штатных КРК и в рассматриваемом в данной работе новом комплексе управления безопасностью, мы ограничимся здесь лишь аспектами создания всех трех компонентов для КУБ – кадрового, технического и информационного. Если вопросы формирования первичной информации о безопасности процессов функционирования НТО ТК и СК были рассмотрены в главе 2, то в настоящей главе основное внимание уделено организационно-кадровому и техническому аспектам организации управления безопасностью, а также связующему их элементу – системе поддержки принятия решений при управлении безопасностью НТО ТК и СК.

#### **4.1. Синтез организационно-кадровых структур управления безопасностью**

Для управления безопасностью НТО ТК и СК требуется привлечение специалистов различной квалификации, в обязанности которых входит непосредственная реализация всего множества задач по обеспечению безопасности процессов функционирования НТО ТК и СК. В связи с этим возникает необходимость их организации в отдельные подразделения (органы управления) с определением круга задач, за выполнение которых руководители данных подразделений несут ответственность, и наделением их необходимыми полномочиями.

Под организационно-кадровой структурой управления безопасностью НТО ТК и СК будем понимать совокупность взаимосвязанных органов управления безопасностью, выполняющих свои обязанности на протя-

жении всего жизненного цикла наземного комплекса КРК.

К числу основных концептуальных свойств, которые с достаточной полнотой характеризуют конкретные организационно-кадровые структуры, относятся следующие:

**Иерархичность.** Структуризация сложных и больших систем предполагает привлечение для их членения и модельного представления методов декомпозиции и агрегирования. Результатом подобной структуризации является, как правило, представление модели исходной системы в иерархическом виде с использованием отношений типа «система-подсистема-элемент». Аналогичная ситуация имеет место при рассмотрении организационно-кадровых структур, когда отношение согласованности представляется в виде иерархической схемы подразделений различных уровней. При этом на верхних уровнях такой иерархии сконцентрированы полномочия по принятию наиболее важных (стратегических) решений, а элементами самого нижнего уровня принято считать специалистов, непосредственно осуществляющих решение задач управления состоянием технических средств. Иерархическая схема используется при рассмотрении различных типов организационно-кадровых структур управления для решения задачи их анализа.

**Функциональная специализация.** Данная характеристика исторически выступает в качестве одного из наиболее важных аспектов структуризации организационно-кадровых структур управления, смысл которого заключается в объединении в отдельных подразделениях функционально однородных видов деятельности и соответственно специалистов одной предметной облас-

ти. В этом случае подразделения организационно-кадровых структур управления превращаются в функционально специализированные подразделения (отделы, лаборатории, группы), которые отвечают за решение отдельных классов задач, реализующих одну из функций управления безопасностью.

**Целевая структуризация.** Необходимость реализации сложных программ управления безопасностью НТО ТК и СК в целом обуславливает организационное выделение специальных подразделений, в задачи которых входит достижение отдельных целей программ обеспечения безопасности. В этом случае руководители соответствующих целевых подразделений несут ответственность за выполнение отдельных целевых программ обеспечения безопасности и наделяются полномочиями по координации работы специалистов различной функциональной специализации. Свойство целевой структуризации организационно-кадровых структур управления отражает принцип программно-целевого управления и тесно связано с рассмотрением программно-целевых и матричных типов организационно-кадровых структур управления, которые будут проанализированы далее.

**Формальная и неформальная структура.** Говоря о формальной организационно-кадровой структуре управления, часто имеют в виду ее представление в виде организационно-штатной структуры, которая представляет собой перечень основных подразделений и должностных лиц в каждом из подразделений, их категорий, должностных обязанностей, а также различные схемы их взаимодействия при решении задач управления эксплуатацией. Такая структура формально регламентирует отношения субординации и координации и закрепляет их в форме должностных инструкций, инст-

рукций по действиям в особых условиях и других документов, имеющих определенный правовой статус.

В процессе функционирования НТО ТК и СК наряду с формальной организационно-кадровой структурой управления складывается определенная неформальная организационно-кадровая структура управления, обусловленная системой межличностных и межгрупповых связей, информационных контактов, симпатий и антипатий, не закрепленных в соответствующих документах. Неформальные отношения, как правило, выходят далеко за рамки психологически-межличностного общения и оказывают влияние на качество принимаемых решений и их реализацию при управлении технологическим процессом. Неформальная структура в одних случаях может играть положительную роль, дополняя формальную структуру на случай опасных ситуаций, а в других случаях – отрицательную роль, затрудняя реализацию принятых решений и внося элементы дезорганизации в процессы управления безопасностью. Важно во всех случаях учитывать особенности формальной и неформальной организационно-кадровых структур управления и использовать имеющийся организационный потенциал для повышения эффективности функционирования комплекса в целом.

**Самоорганизация.** Данное свойство организационно-кадровых структур управления проявляется в возможности реконфигурации отдельных подразделений, как правило, на неформальной основе, исходя из текущих целей и особенностей их достижения. В этом случае свойство самоорганизации организационно-кадровых структур управления определяется наличием в КУБ организационного потенциала, т.е. высококвалифицированных специалистов из различных предметных

областей. Чем выше квалификация и шире профессиональные знания и умения специалистов и руководителей подразделений, тем выше организационный потенциал системы эксплуатации НТО ТК и СК в целом.

**Централизация и децентрализация.** Централизация управления определяется степенью концентрации функций принятия решений на верхних уровнях иерархии организационно-кадровых структур управления. Децентрализация отражает свойство делегирования полномочий по принятию определенных решений на низшие уровни управления или, в пределе, непосредственно специалистам в подразделениях. Централизация играет важную роль в организации функционирования НТО ТК и СК, что определяется важностью функций принятия стратегических и оперативно-тактических решений, направленных на обеспечение безопасности процессов функционирования СК и ТК. Централизация обеспечивает высокое качество принимаемых решений за счет участия в их подготовке большого числа специалистов нижних уровней управления, создает предпосылки для интеграции разнотипных подсистем в единую систему, обеспечивает экономию ресурсов за счет исключения дублирования работ и всестороннего контроля их использования. Однако при определенных условиях централизация снижает оперативность принятия решений, вносит элементы консерватизма в функционирование НТО ТК и СК, уменьшает их безопасность. Чтобы исключить проявление указанных отрицательных факторов, целесообразно делегирование полномочий, прежде всего по оперативному (технологическому) управлению, на низшие уровни организационно-кадровых структур управления. Помимо этого целесообразность децентрализации может быть обусловлена

территориальным или функциональным рассредоточением подразделений, эксплуатирующих СК и ТК, а также созданием мобильных подразделений управления безопасностью комплексов.

**Стиль руководства.** Поскольку руководитель подразделения является лицом, наделенным определенным объемом полномочий по принятию решений, особенности его деятельности как субъекта в общем случае стали предметом научного рассмотрения и анализа, что привело к появлению специальной области знаний, получившей название менеджмента [125, 126]. В рамках существующих взглядов стиль руководства определяется как устойчивое мнение руководителя относительно степени творческой свободы и инициативы, которая должна быть предоставлена подчиненным в подготовке и реализации принятых решений. Стиль руководства условно можно характеризовать некоторой точкой на кривой управленческого континуума, которая изображена на рис. 4.1.

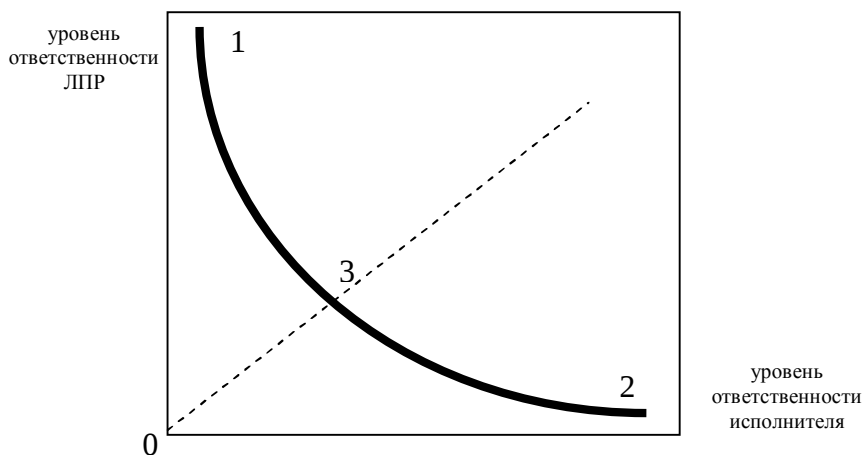


Рис. 4.1.



Отдельные позиции данного континуума характеризуются различным стилем руководства. Позиция 1 (рис. 4.1) соответствует ситуации, когда руководитель принимает решения по всем без исключения функциям управления, которые подчиненные обязаны выполнять без обсуждения и внесения в них коррективов по улучшению, при этом принятие решений руководителем происходит без изучения мнений подчиненных. Позиция 2 (рис. 4.1) – руководитель фактически устранен из процесса принятия решений, его обязанности выполняют неформальные лидеры или наиболее квалифицированные специалисты из подчиненных, при этом зачастую в подразделениях царит благодушие и довольство достигнутыми результатами.

В реальных ситуациях, в зависимости от решаемых задач по управлению безопасностью, стили руководства для разных уровней организационно-кадровых структур управления должны находиться в районе поз. 3 (рис. 4.1), когда руководитель принимает решения по части функций управления, по другой части функций управления решения принимают сами подчиненные, главное, что определяет качество решений, – это достижение целей управления безопасностью.

**Диапазон контроля** (норма управляемости). Данное свойство качественно определяет среднее число подчиненных, деятельностью которых может успешно управлять один руководитель. Общие рекомендации по выбору рационального диапазона контроля можно получить из анализа интервала дискретности нормы управляемости [44]. Рекомендуемый диапазон контроля варьируется от 3-5 человек для реализации сложных (проблемных) решений в динамической среде с элементами неопределенности до 12-15 человек для реализа-

ции простых (не проблемных) решений в стабильной среде без влияния факторов неопределенности. На выбор и обоснование наиболее подходящего значения данной характеристики оказывают влияние также квалификация подчиненных, стиль руководства и другие рассматриваемые свойства организационно-кадровых структур управления.

**Коммуникация.** Информационный характер процессов принятия решений в организационно-кадровой структуре КУБ обуславливает необходимость рассмотрения особенностей коммуникации в качестве важного свойства организационно-кадровой структуры управления безопасностью. При этом под коммуникацией понимается весь круг вопросов по получению, передаче, восприятию и уточнению информации в КУБ с использованием формальных и неформальных каналов, а также субъективных мнений малых групп и оценок экспертов.

Коммуникация организационно-кадровой структуры управления безопасностью отражает только структурный аспект информационных взаимосвязей в подразделениях и неформальных группах в виде так называемой коммуникационной сети, оставляя в стороне общие вопросы анализа средств, методов и моделей передачи и обработки информации, а также вопросы ее отображения и хранения на различных носителях. Описание возможных видов структур основано на использовании коллегиального общения подчиненных при реализации различных стилей руководства в организационно-кадровой структуре управления безопасностью.

Рассмотренные выше свойства организационно-кадровой структуры управления безопасностью позволяют концептуально сформулировать задачи ее синтеза. Под задачей синтеза организационно-кадровой структу-

ры управления безопасностью понимается задача определения характеристик указанных свойств для отдельных подразделений КУБ, которые обеспечат получение заданного или наилучшего значения показателя качества управления безопасностью НТО ТК и СК.

Общая типизация организационно-кадровой структуры управления КУБ основывается на выявлении устойчивых взаимосвязей и особенностей структурного построения подразделений КУБ, характеризующих возможности подготовки, принятия и реализации решений по функциям управления безопасностью. Введение некоторого числа возможных типов организационно-кадровой структуры управления, которые отражают определенные отношения субординации (подчинения) и координации (взаимодействия) в подразделениях, служит концептуальной основой конструктивного решения задач синтеза таких систем. Различают следующие основные типы организационно-кадровой структуры управления [128].

**Линейная структура.** Линейной такая структура называется потому, что связь между элементами организации отображается одной линией. Тэйлор называл такую организацию военной. В этой структуре в полной мере обеспечивается принцип единоначалия: все функции управления подчиненными сосредоточены в одних руках. Это исключает получение подчиненными противоречивых указаний и вместе с тем предъявляет особые требования к руководителям: разносторонность и конкретность знаний, необходимых для правильного руководства подразделениями. Это требование становится трудновыполнимым по мере увеличения количества подразделений и специфических особенностей каждого из них. Графически линейная система условно изобра-

жается в виде графа иерархического вида (дерева), вершины нижнего уровня которого соответствуют специалистам подразделений (исполнителям решений), вершины верхних (не нижних) уровней – руководителям подразделений, а корневая вершина дерева – главному руководителю всей организации (ЛПР – лицу, принимающему решение). Ребра отражают отношения субординации между руководителями и подчиненными. Так, например, для изображенной на рис. 4.2 линейной системы главный руководитель (ЛПР) осуществляет линейное руководство тремя подразделениями, непосредственно взаимодействуя с их руководителями (вершины 2, 3, 4). При этом у руководителя 1-го подразделения (вершина 2) находятся в подчинении 3 специалиста (вершины 5, 6, 7), у руководителя 2-го подразделения (вершина 3) – 3 специалиста (вершины 8, 9, 10), у руководителя 3-го подразделения (вершина 4) – 3 специалиста (вершины 11, 12, 13).

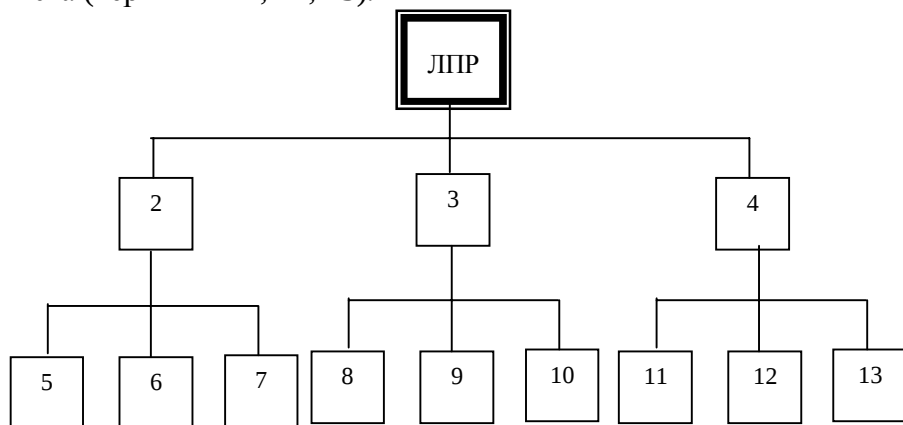


Рис. 4.2. Линейная организационно-кадровая структура управления безопасностью

К достоинствам линейных систем относятся: четкое разграничение прав и обязанностей, надежные вертикальные коммуникации, полнота контроля работы подчиненных и расходования ресурсов, возможность интеграции разнородных подсистем и использование в подразделениях специалистов невысокой квалификации. Помимо положительных качеств, линейным системам присущи следующие недостатки:

- перегрузка верхних уровней управления решением главным образом задач оперативного управления, что снижает общее качество принимаемых решений;
- опасность искажения и потери информации при ее передаче через промежуточные звенья по длинным вертикальным каналам коммуникаций;
- опасность необоснованного увеличения количества специалистов в подразделениях и последующего появления дополнительных уровней управления в иерархии;
- высокие требования, предъявляемые к квалификации ЛПР.

Указанные особенности позволяют сделать вывод о целесообразности использования данного типа организационно-кадровой структуры управления безопасностью для решения хорошо регламентированных задач оперативного управления и контроля штатного технологического процесса подготовки и пуска РКН, с заранее известной технологией принятия решений в стабильной обстановке при отсутствии непредвиденных факторов опасности. Напротив, линейная структура нецелесообразна при подготовке и принятии сложных качественно новых решений, требующих комплексного анализа пер-

спектив и последствий их реализации в условиях динамически изменяющейся обстановки появления и развития опасных факторов. Кроме того, она затрудняет возможность полноценного использования изменяющегося организационного потенциала, сковывая инициативу подчиненных и ограничивая их действия строгими рамками должностных инструкций и положений.

**Функциональная система.** Функциональная организационно-кадровая структура управления безопасностью предполагает разделение процесса управления в целом на отдельные функции и назначение по каждой из выделенных функций управления своего функционального руководителя. Структура организации данного типа может быть условно изображена в виде графа (рис. 4.3), где вершины 2, 3, 4 – функциональные руководители по каждой из трех различных функций управления (например, планирование безопасности, оперативное управление технологическим процессом, анализ текущего состояния опасности), вершины 5-13 – специалисты в подразделениях.

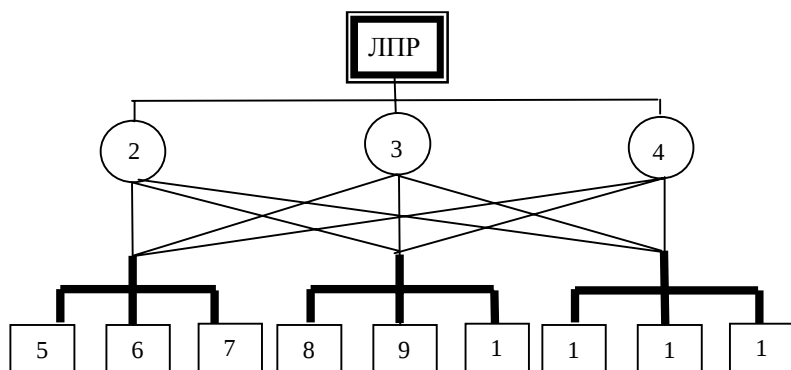


Рис. 4.3. Функциональная организационно-кадровая структура управления безопасностью

Каждый из функциональных руководителей имеет право отдавать распоряжения специалистам по решению задач своей функциональной области и требовать от них исполнения принятых решений. Общая координация работы осуществляется главным руководителем организации.

К достоинствам функциональных организационно-кадровых структур управления безопасностью относятся: высокое качество решений по отдельным функциям управления, принимаемых и контролируемых функциональными руководителями; разгрузка ЛПР от принятия решений по оперативному управлению, что входит в компетенцию отдельного функционального руководителя; квалифицированный контроль исполнения решений и возможность решения комплексных проблем управления. Недостатками структуры этого типа являются: нарушение принципа единоначалия, что может дезорганизовать работу всей организации в случаях развития опасных ситуаций; наличие многочисленных каналов коммуникации, что усиливает нагрузку на средства передачи информации, порождает сбои и ошибки в работе; необходимость сложной координации ЛПР работы функциональных руководителей; возможность возникновения конфликтных ситуаций, связанных с несвоевременным выполнением отдельных функциональных задач; невозможность установления персональной ответственности за достижение целей управления безопасностью. При стабильном функционировании рассматриваемой организационно-кадровой структуры управления безопасностью в течение достаточно длительного времени в ней самостоятельно складываются горизонтальные связи между функциональными руководителями, что позволяет частично сгладить названные недостатки. Однако в общем случае серьезный характер

этих недостатков обуславливает необходимость применения функциональных организационно-кадровых структур управления безопасностью, как правило, в комбинации с другими типами таких систем.

**Линейно-функциональная.** Желание совместить достоинство линейных и функциональных организационно-кадровых структур управления безопасностью и одновременно снизить их недостатки способствует рассмотрению их комбинации в виде линейно-функциональной структур. Для такой структуры характерно своеобразное разделение полномочий, при котором линейные руководители обладают правом принятия (утверждения) решений, а функциональные руководители осуществляют квалифицированную подготовку и контроль за исполнением принятых решений, теряя при этом, по существу, часть своих руководящих полномочий.

Организационно-кадровая структура управления безопасностью такого типа условно представлена на рис. 4.4, где вершина 1 (ЛПР) соответствует главному руководителю, вершины 3 и 4 – руководителям отдельных подразделений, что отражает линейную часть организационно-кадровой структуры. Вершины 2 и 5 соответствуют функциональным руководителям, как правило, в ранге заместителей ЛПР по отдельным вопросам.

Достоинства линейно-функциональных организационно-кадровых структур проявляются в обеспечении высокого качества принимаемых решений за счет привлечения функциональных руководителей к их подготовке и контролю за исполнением, а также за счет реализации принципа единоначалия и возможности четкой регламентации работы специалистов в подразделениях.



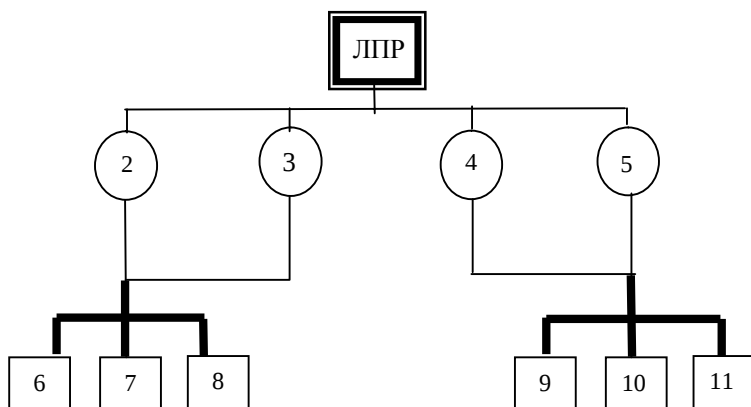


Рис. 4.4 Линейно-функциональная организационно-кадровая структура управления безопасностью

Линейно-функциональная организационно-кадровая структура создает предпосылки для образования функционально специализированных подразделений, в которых со временем сосредоточиваются специалисты высокой квалификации, образуя тем самым организационный потенциал системы, что способствует решению сложных наукоемких задач и проблем обеспечения безопасности. Концентрация в отдельных подразделениях специалистов высокой квалификации способствует их дальнейшему профессиональному росту, а также подготовке новых специалистов.

Недостатками линейно-функциональных организационно-кадровых структур являются: возможность необоснованного расширения отдельных подразделений за счет включения в них специалистов по все более узким направлениям специализации; недостаточная за-

грузка специалистов в подразделениях; преувеличение руководителями отдельных подразделений роли и места своих подразделений в достижении целей системы и связанная с этим трудность распределения дефицитных ресурсов по подразделениям, и наконец, трудности реализации комплексных целевых программ в установленные сроки при ограниченных ресурсах.

Указанные особенности линейно-функциональных организационно-кадровых структур обусловили их широкое распространение в практике организационного управления небольшими системами.

**Линейно-штабная структура.** Линейно-штабная организационно-кадровая структура является разновидностью линейно-функциональных структур, возникновение которой преследует цель преодолеть информационные перегрузки руководителей верхних уровней управления безопасностью в больших организациях, не снижая высокого качества решений и оперативности контроля за их исполнением. Для линейно-штабной организационно-кадровой структуры характерно наличие на верхних уровнях управления специальных подразделений, подчиненных руководителям соответствующих уровней и состоящих из специалистов по отдельным функциям управления. Графически такая организационно-кадровая структура имеет вид дерева, которое помимо вершин содержит прямоугольники, изображающие соответствующие штабные подразделения. Так, например, на рис. 4.5 прямоугольник Ш1 соответствует штабу главного руководства, а прямоугольники Ш2, Ш3, Ш4 – штабам отдельных подразделений.

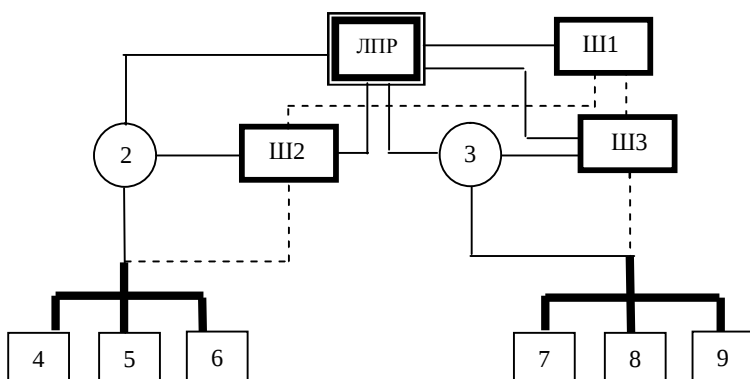


Рис. 4.5 Линейно-штабная организационно-кадровая структура управления

В общем случае штабные подразделения наделяются определенными полномочиями по координации и контролю исполнения решений, обеспечивая организационно-аналитическую подготовку принятия решений.

Линейно-штабные организационно-кадровые структуры в настоящее время являются наиболее распространенным типом для больших организаций (армии, отраслей промышленности, крупных научно-производственных объединений).

**Программно-целевая организационно-кадровая структура.** Программно-целевая организационно-кадровая структура призвана обеспечить возможность создания организационных предпосылок для выполнения современных комплексных целевых программ, к числу которых может, например, относиться создание

системы эксплуатации новых ракетно-космических комплексов. Традиционные организационно-кадровые структуры затрудняют реализацию таких программ, поскольку отсутствует целевая координация деятельности подразделений, что, как правило, приводит к необходимости привлечения необоснованно больших ресурсов и увеличивает сроки выполнения программ. При этом формальное назначение ответственного лица за выполнение целевой программы в линейно-функциональной или линейно-штабной организационно-кадровой структуре не решает проблему и не приводит к удовлетворительным результатам.

Для программно-целевой организационно-кадровой структуры характерно выделение из функциональных подразделений необходимых для выполнения целевой программы специалистов и их организационное объединение в отдельную проектную (целевую) группу, которая выполняет роль координатора горизонтальных связей между функциональными подразделениями [129, 130]. Руководитель целевой группы несет персональную ответственность за выполнение целевой программы в установленные сроки и расходование выделенных для нее ресурсов, ему подчиняются все специалисты целевой группы на время выполнения проекта. После выполнения проекта все специалисты возвращаются в распоряжение руководителей своих функциональных подразделений, которые фактически теряют связь с ними при решении задач целевой программы.

Графически программно-целевая организационно-кадровая структура изображается в виде графа (рис. 4.6), в котором вершина 4 изображает целевую группу – интегратора горизонтальных связей.

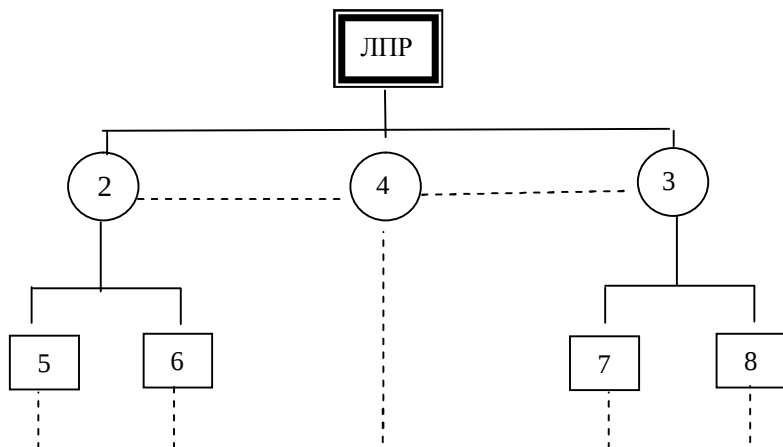


Рис. 4.6. Программно-целевая организационно-кадровая структура управления безопасностью

Основное достоинство программно-целевых организационно-кадровых структур заключается в том, что они обеспечивают комплексное управление всей системой в целом как единым объектом, ориентированным на заданную цель. Это позволяет добиться рационального расходования ограниченных ресурсов, высокого качества решения отдельных задач и своевременности выполнения программы в целом. Программно-целевые организационно-кадровые структуры нашли широкое применение при выполнении перспективных программ целевого управления сложными организационно-техническими системами.

**Матричная организационно-кадровая структура управления.** Объединение линейно-функциональной и программно-целевой структур, сочетающееся с пере-

распределением функций между их органами, приводит к образованию матричной организационно-кадровой структуры. Особенность матричной организационно-кадровой структуры управления заключается в двойном подчинении специалистов целевых групп: руководителю программы и руководителю соответствующего функционального подразделения, в штат которого входил ранее данный специалист. При этом руководитель функционального подразделения контролирует качество решений, принимаемых соответствующими специалистами целевых групп, регулирует их загрузку и не допускает дублирования работ по различным программам. Руководитель целевой программы отвечает за сроки выполнения работ, рациональное расходование выделенных ресурсов и соответствие результатов программы установленным требованиям. Графически матричные организационно-кадровые структуры управления изображаются в виде специального графа, по форме напоминающего матрицу, что и послужило причиной их названия. Так, например, изображенный на рис. 4.7 вариант матричной организационно-кадровой структуры управления состоит из трех целевых групп, возглавляемых руководителями (вершины 1, 2, 3) и трех функциональных подразделений с соответствующими руководителями (вершины 4, 5, 6). Специалисты 7-9 образуют первую целевую группу, 10-12 – вторую, а 13-15 – третью. Специалисты 7, 10, 13 входят в состав первой функциональной группы; 8, 11, 14 – второй; 9, 12, 15 – третьей. На уровне главного руководителя имеется штабное подразделение (Ш1) с функциями целевой координации и функционального контроля.

В заключение следует отметить, что реальные ОСУ являются гибридными. В них используются комбинации рассмотренных типов ОСУ или их фрагментов.

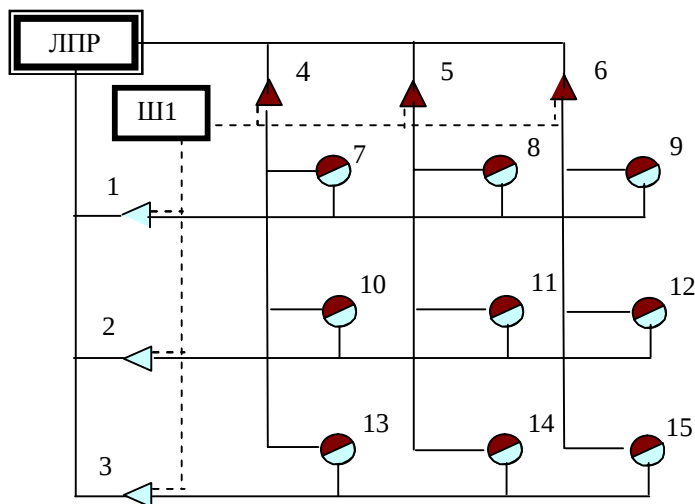


Рис. 4.7. Матричная организационно-кадровая структура управления.

#### 4.1.1. Выбор типа организационно-кадровой структуры управления безопасностью.

Рассмотренные выше базовые типы организационно-кадровых структур управления безопасностью образуют концептуальный базис решения задач синтеза таких систем. При этом тип организационно-кадровой структуры управления безопасностью и его графическое представление можно считать концептуальной моделью организационно-кадровой структуры управления безопасностью и использовать для дальнейшей проработки вопросов построения адекватных математических моделей. До недавнего времени указанная задача относилась к классу неформализуемых проблем системного анализа [126, 131 ÷ 134], и лишь недавние исследования позволили сделать вывод о ее слабой формализуемости и

возможности привлечения для ее решения адекватного математического аппарата – методов иерархического кластерного анализа [135 ÷ 137]. Исходной предпосылкой для этого послужило графическое сходство изображения типа организационно-кадровой структуры управления (графа в виде дерева) и результата иерархического кластерного анализа (дендрограммы). При этом предполагается, что все базовые типы организационно-кадровых структур управления безопасностью образуют некоторый континуум (области) значений соответствия функциональной специализации и целевой структуризации задач, решаемых в рамках организационно-кадровых структур управления безопасностью. Условно данное соответствие можно изобразить графически в виде «областей предпочтительности разных типов организационно-кадровых структур управления безопасностью» (рис. 4.8).

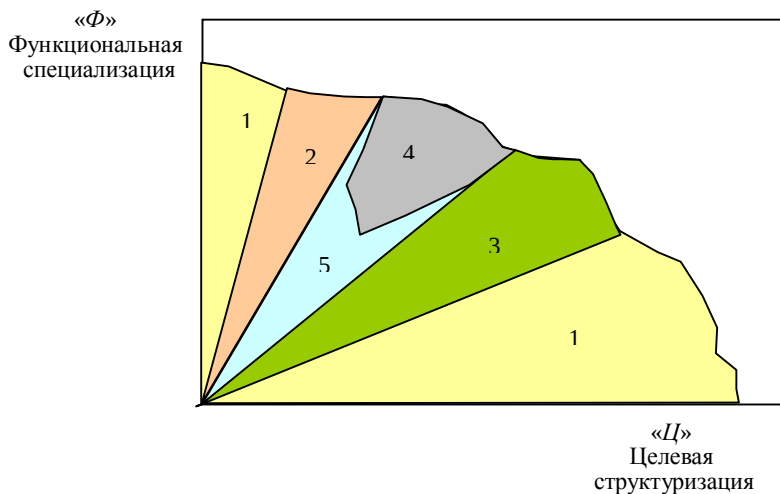


Рис. 4.8. Области предпочтительности типов организационно-кадровых структур управления безопасностью



На этом рисунке цифрами обозначены: 1 – линейная организационно-кадровая структура управления; 2 – линейно-функциональная организационно-кадровая структура управления; 3 – программно-целевая организационно-кадровая структура управления; 4 – матричная организационно-кадровая структура управления; 5 – линейная, линейно-функциональная или программно-целевая организационно-кадровая структура управления.

Ось абсцисс соответствует интенсивности проявления целевой структуризации задач организационно-кадровой структуры управления ( $Ц$ ), а ось ординат – глубине функциональной специализации задач организационно-кадровой структуры управления ( $Ф$ ). Такая диаграмма имеет качественный характер, поскольку отсутствуют конструктивные методы количественного измерения характеристик « $Ф$ » и « $Ц$ ».

Анализ диаграммы позволяет сделать вывод о том, что при одностороннем проявлении только параметра « $Ц$ » или только параметра « $Ф$ » целесообразно использовать линейные организационно-кадровые структуры управления, что характеризует один предельный случай. Напротив, при одновременном проявлении параметров « $Ф$ » и « $Ц$ » предпочтительнее использовать матричные организационно-кадровые структуры управления, что характеризует другой предельный случай. Для получения количественной оценки сходства характеристик « $Ф$ » и « $Ц$ » используются методы иерархического кластерного анализа.

В формальной постановке задачи выбора типа организационно-кадровой структуры управления безопасностью с помощью иерархического кластерного анализа используются следующие исходные данные:

1. Множество целевых, обеспечивающих и вспомогательных задач, которые должны решаться при управлении безопасностью:

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}, n \in N, N = \{1, 2, \dots\}.$$

Это множество задач представляет собой нижний уровень дерева целей и задач в обеспечении безопасности и образует основу функциональной структуры КУБ.

2. Целевое сходство задач исходного множества  $A$ , задаваемое в виде отображения «Ц»:  $A \times A \rightarrow [0,1]$ , удовлетворяющего двум условиям:

$$\text{«Ц»}(a_i, a_j) = 1 \ (\forall a_i \in A) \text{ и}$$

$$\text{«Ц»}(a_i, a_j) = \text{«Ц»}(a_j, a_i) \ (\forall a_i, a_j \in A).$$

Чем ближе значение «Ц» ( $a_i, a_j$ ) к 1, тем теснее взаимосвязь задач  $a_i$  и  $a_j$  в достижении единой цели. Напротив, близкое к 0 значение «Ц» ( $a_i, a_j$ ) характеризует использование задач  $a_i$  и  $a_j$  для достижения различных целей.

3. Функциональное сходство задач исходного множества  $A$ , которое задается так же, как и целевое сходство, т.е. в виде отображения «Ф»:  $A \times A \rightarrow [0,1]$ , удовлетворяющего условиям:

$$\text{«Ф»}(a_j a_i) = 1 \ (\forall a_i \in A) \text{ и}$$

$$\text{«Ф»}(a_i, a_j) = \text{«Ф»}(a_j, a_i) \ \forall a_i, a_j \in A).$$

Чем ближе значение «Ф» ( $a_j, a_i$ ) к 1, тем функционально однороднее задачи  $a_i$  и  $a_j$ , и наоборот.

При иерархическом кластерном анализе множества задач  $A$  по их целевому и функциональному сходству требуется получить два иерархических разбиения

$$T_{\text{Ц}} = \{R_{\text{Ц}}^{\alpha}\}, \ \alpha \in G \text{ и } T_{\text{Ф}} = \{R_{\text{Ф}}^{\beta}\}, \ \beta \in F,$$

где  $G, F$  – множества индексов, упорядочивающих разбиения  $R_{\text{Ц}}^{\alpha}$  и  $R_{\text{Ф}}^{\beta}$  по соответствующим уровням.

Множества иерархических разбиений  $T_{\Pi}$  и  $T_{\Phi}$  должны удовлетворять условию вложенности разбиений различных уровней:

$$\forall R_{\Pi}^{\alpha_1}, R_{\Pi}^{\alpha_2} (\alpha_1, \alpha_2 \in G), \text{ если } \alpha_1 < \alpha_2,$$

для  $\forall A_i^{\Pi} \in R_{\Pi}^{\alpha_1}, \exists A_j^{\Pi} \in R_{\Pi}^{\alpha_2}$ , так что  $A_i^{\Pi} \subset A_j^{\Pi}$ , для остальных  $A_r^{\Pi} \subset A_{\Pi}^{\alpha_2}$ ,  $A_r^{\Pi} \neq A_j^{\Pi}$ , выполнено  $A_i^{\Pi} \cap A_r^{\Pi} = \emptyset$ . Аналогичное условие может быть записано и для  $T_{\Phi}$ . Решение о выборе соответствующего типа организационно-кадровых структур управления безопасностью принимается на основе сравнения структурного подобия полученных иерархических разбиений  $T_{\Pi}$  и  $T_{\Phi}$ . При этом высокой степени подобия отвечает линейная организационно-кадровая структура управления безопасностью, а самой низкой степени подобия – матричная организационно-кадровая структура управления безопасностью.

Для формирования дендрограмм  $T_{\Pi}$  и  $T_{\Phi}$  могут быть использованы методы соединительного иерархического кластерного анализа, общий алгоритм которых представлен в [126]. В этой же работе показано, что для современных условий, сложившихся для отечественных КРК, предпочтительной организационно-кадровой структурой управления эксплуатацией является матричная структура. Целевое единство процессов управления эксплуатацией и обеспечением безопасности НТО ТК и СК позволяет сделать вывод о применимости матричной организационно-кадровой структуры управления безопасностью для КУБ.

4.1.2. Задача наполнения организационно-кадровой структуры управления безопасностью КУБ специалистами имеет целью определение их численности и уровня квалификации. При этом очевидно существуют ограничения по расширению штатного расписания эксплуатирующих НТО ТК и СК подразделений и квалификации специалистов, которые должны обладать знаниями и навыками выполнения как штатных технологических операций, так и операций оценивания и предотвращения опасных ситуаций.

Неформальная постановка такой задачи сводится к оптимальному распределению обслуживающего персонала КРК ограниченной численности по работам, связанным со штатным процессом функционирования НТО ТК и СК и деятельностью в организационно-кадровой структуре управления безопасностью КУБ. При этом следует минимизировать как время выполнения технологического процесса подготовки РКН к пуску, так и время обнаружения и ликвидации опасных ситуаций на комплексе.

Решение этой задачи по аналогии с результатами работы [138] имеет два этапа. На первом этапе определяется оптимальное распределение обслуживающего персонала по работам процесса подготовки РКН и управления безопасностью, а на втором – формируются подразделения для выполнения этих работ с учетом квалификации специалистов.

Штатный процесс подготовки и проведения пуска РКН описывается сетевой моделью. Согласно этой модели время реализации процесса определяется величиной критического пути ( $t_{кр}$ ). Поэтому задача первого этапа формулируется следующим образом:

Найти такое распределение обслуживающего персонала  $n_{ij}$  по работам сетевой модели, при котором критический путь

$$t_{кр} = \max_l \{t_l(1, f)\} \quad l = 1, \dots, S$$

будет иметь минимальную продолжительность и будет выполняться условие

$$\sum_{(i,j) \in A} n_{ij} \leq N$$

$$n_{ij}^{\min} \leq n_{ij} \leq n_{ij}^{\max}, \quad n_{ij} - \text{целые числа, } (i, j) \in A,$$

где  $A$  – множество работ технологического процесса;

$f$  – номер завершающего события;

$S$  – количество путей от исходного события к завершающему событию;

$t_l(1, f)$  – продолжительность  $l$ -го пути от исходного события к завершающему событию;

$n_{ij}^{\min}, n_{ij}^{\max}$  – минимальное и максимальное значения  $n_{ij}$ ;

$N$  – заданная штатная численность обслуживающего персонала, реализующего технологический процесс.

В этой задаче ограничение является аддитивной функцией, а целевая функция может быть вычислена по рекуррентной формуле определения ранних сроков наступления событий сетевой модели технологического процесса. Решение этой задачи целесообразно получить, используя метод динамического программирования, основанного на принципе оптимальности Беллмана. Для введения функционального уравнения Беллмана используем следующие обозначения:

$\xi_j$  – возможное значение количества обслуживающего персонала, достаточного для выполнения работ, необходимых для достижения события  $j$ ;

$N_{ij}$  – множество допустимых значений  $n_{ij} \left( N_{ij} = \overline{n_{ij}^{\min}, n_{ij}^{\max}} \right)$ ;

$N_j(\xi_j) \subseteq \times_{i \in I_j} N_{ij}$  – множество допустимых кортежей

$\langle n_{kj}, n_{lj} \dots n_{mj} \rangle$  при возможном значении  $\xi_j$ , где  $I_j$  – множество номеров событий, непосредственно предшествующих событию  $j$ ,

$$k \in I_j, l \in I_j, \dots, m \in I_j \text{ и } k < l < \dots < m;$$

$n_j$  – элемент множества  $N_j$ ,  $(n_j = \langle n_{kj}, \dots, n_{lj}, \dots, n_{mj} \rangle)$ ;

$T_j(\xi_j)$  – минимальное время достижения события  $j$  при

возможном значении  $\xi_j$ ;

$n_{ij}^*(\xi_j)$  – условно-оптимальное значение  $n_{ij}$  (при условии, что для достижения события  $j$  имеется количество обслуживающего персонала, равное  $\xi_j$ );

$n_j^*(\xi_j) = \langle n_{kj}^*, \dots, n_{lj}^*, \dots, n_{mj}^* \rangle$  – условно-оптимальный

кортеж множества  $N_j$  при возможном значении  $\xi_j$ ;

$n_{\rho k}^* \left( \xi_j - \sum_{i \in I_j} n_{ij} \right)$  – условно-оптимальное значение  $n_{\rho j}$

(при условии, что для достижения события  $k$ , ближайшего к  $j$  ( $k \prec j$ ), имеется количество обслуживающего персонала, равное

$$\left( \xi_j - \sum_{i \in I_j} n_{ij} \right), \text{ где } \rho \in I_k \subset I_j;$$

$t_{ij}(n_{ij})$  – функциональная зависимость времени  $t_{ij}$  выполнения работы  $(i, j)$  от выделенного для нее количества  $n_{ij}$  обслуживающего персонала.

С учетом этих обозначений соотношения, необходимые для пошагового вычисления целевой функции и определения условно-оптимальных значений  $n_{ij}$ , могут быть записаны в виде:

$$T_j(\xi_j) = t_{1j}(n_j^{\max}(\xi_j)) \quad n_j^*(\xi_j) = n_j^{\max}(\xi_j), \quad j = \overline{2, \eta},$$

где  $n_j^{\max}(\xi_j)$  – максимальный элемент множества  $N_j(\xi_j)$ ,

$j = 2, 3, \dots, \eta$  – номера событий первого ранга сетевой модели технологического процесса (событий, которые могут быть пронумерованы после «вычеркивания» работ, выходящих из первого события),

$$T_j(\xi_j) = \min_{n_j \in N_j} \max_{i \in I_j} \left( t_{ij}(n_{ij}) + T_i \left( \xi_j - \sum_{i \in I_j} n_{ij} - \sum_{\rho \in I_k} n_{\rho k}^* \left( \xi_j - \sum_{i \in I_j} n_{ij} \right) \right) \right)$$

$$n_j^*(\xi_j) = \arg \min_{n_j \in N_j} \max_{i \in I_j} \left( t_{ij}(n_{ij}) + T_i \left( \xi_j - \sum_{i \in I_j} n_{ij} - \sum_{\rho \in I_k} n_{\rho k}^* \left( \xi_j - \sum_{i \in I_j} n_{ij} \right) \right) \right),$$

где  $j = \overline{\eta + 1, f}$ .

На последнем шаге при  $\xi_f = N$  найдем минимальную продолжительность критического пути и оптимальные значения  $n_{if}^{opt} (i \in I_f)$ . Зная  $n_{if}^{opt}$ , можно найти оптимальные кортежи

$$n_{f-1}^{opt} = n_{f-1}^* \left( \xi_{f-1}^{opt} = N - \sum_{i \in I_f} n_{if}^{opt} \right),$$

$$n_{f-2}^{opt} = n_{f-2}^* \left( \xi_{f-1}^{opt} = - \sum_{i \in I_{f-1}} n_{if-1}^{opt} \right),$$

.....

$$n_2^{opt} = n_2^* \left( \xi_3^{opt} - \sum_{i \in I_3} n_{i,3}^{opt} \right).$$

Каждый из кортежей  $n_j^{opt}$  содержит оптимальные значения  $n_j^{opt} (i \in I_j)$ . На этом решение задачи первого этапа заканчивается.

На втором этапе выполняется неформальная процедура выделения совокупностей работ, соответствующих тем или иным квалификациям обслуживающего персонала. Предположим, что в результате анализа характера работ, выполняемых при реализации технологического процесса, определено количество  $K$  таких квалификаций (специальностей) и множества  $\Phi_k (k = \overline{1, K})$  совокупностей работ, для выполнения которых необходимо выделить  $k$ -й обслуживающий расчет. Множество работ технологического процесса описывается соотношением

$$\Phi = \bigcup_{k=1}^K \Phi_k.$$

Тогда количественный состав  $k$ -го расчета обслуживающего персонала может быть определен по соотношению

$$M_k = \max_{(i, j) \in \Phi_k} (n_{ij}).$$

Такие расчеты, выполненные для одного значения  $N$ , приводят к ситуации, когда суммарная численность обслуживающего персонала в расчетах может оказаться как меньше, так и больше заданной численности, в этом случае придется выполнить дополнительные вычисления при большем или меньшем значении  $\xi_f$  соответственно. Поэтому такие расчеты необходимо сразу проводить для спектра значений

$$N = \overline{\sum_{(i, j) \in A} n_{ij}^{\min}, \sum_{(i, j) \in A} n_{ij}^{\max}},$$



что позволит получить спектр значений суммарной численности расчетов, из которых можно выделить требуемое значение.

Целью процесса функционирования КУБ является обеспечение своевременного выполнения технологического процесса подготовки и пуска РКН с назначенными значениями показателей безопасности. Для достижения этой цели необходимо выполнить определенный технологией комплекс работ  $L$  в течение заданного промежутка времени  $(0, \tau_n]$ :

$$L = \{l_i\}, i = 1(1)v_1,$$

где  $v_1$  – количество работ, которые необходимо выполнить для достижения цели. Выполнение всех работ  $L$  будем рассматривать как позитивный эффект работы ТК и СК совместно с КУБ, а выполнение определенных работ  $l_i$  – как достижение промежуточных результатов.

Для выполнения каждой работы необходимы специалисты определенных специальностей, что отражается в требованиях к специализации обслуживающего персонала, выделенного для проведения работ. Эти требования могут быть заданы бинарным отношением:

$$r_1 = \langle D, L, R_1 \rangle, R_1 \subseteq D \times L, \quad (4.1)$$

где  $D = \{d_i\}, i = 1(1)s$ , – множество специальностей, необходимых для выполнения комплекса работ  $L$ .

Комплекс работ  $L$  выполняется в пределах определенного интервала времени, что можно описать отношением

$$r_2 = \langle L, T, R_2 \rangle, R_2 \subseteq L \times T, \quad (4.2)$$

$T = \{\Delta t_i\}, i = 1(1)v_2$  - множество дискретных промежутков времени,  $\Delta t_i \in (0, \tau_n]$ .

Для выполнения комплекса работ  $L$  формируется расчет обслуживающего персонала, состоящий из специалистов  $j \in J$ , способных выполнить определенные работы  $l \in L$ , то есть обученных определенным специальностям  $d' \in D', D' = \{d'_i\}, i = 1(1)s_1$ . Эта связь отражается бинарным отношением

$$r_3 = \langle D', J, R_3 \rangle, R_3 \subseteq D' \times J, \quad (4.3)$$

где  $J = \{j_i\}, i = 1(1)u$ , - множество участников расчета,  $u = \text{card } J$  - количество обслуживающего персонала в расчете.

Весьма важными являются такие характеристики совместных расчетов КУБ и штатного технологического процесса, как количество специалистов одинаковых специальностей, а также количество специальностей, которыми владеет каждый член расчета. Эти характеристики представляют собой фактор-множества  $J$  и  $D'$  по графику  $R_3$  (отношению  $r_3$ ) соответственно:  $J / R_3, D' / R_3$ .

Фактор-множество  $J / R_3$  представляет собой описание перечня специальностей, которыми владеет каждый номер расчета. Фактор-множество  $D' / R_3$  - это описание квалификации специалистов из состава расчета, требуемых для выполнения каждой работы.

Для подготовки каждого специалиста расчета требуется определенное время. Формально это можно выразить через отношение:

$$r_4 = \langle J, D', T_0, R_4 \rangle, R_4 \subseteq J \times D' \times T_0, \quad (4.4)$$

где  $T_0 = \{\Delta t_{0i}\}$ ,  $i = 1(1)s_1$  – множество дискретных промежутков времени, необходимых для подготовки соответствующих специалистов.

Связь между специальностями, по которым происходит обучение, и специальностями, которые необходимы для выполнения работ  $l \in L$ , выражается отношением  $r_5$ : специалист, имеющий определенную квалификацию, может быть назначен на вполне определенную должность в составе расчета. Иными словами, отношение  $r_5$  отражает соответствие друг другу специальностей  $D$  и  $D'$ :

$$r_5 = \langle D, D', R_5 \rangle, R_5 \subseteq D \times D'. \quad (4.5)$$

С точки зрения использования имеющихся в штате ТК и СК специалистов при выполнении работ по направлению КУБ и выполнении технологического процесса назначение соответствующего специалиста  $j \in J$  для проведения работы  $l \in L$  означает, что он не может быть использован в это время для проведения работы одновременно в структуре КУБ и штатном расчете подготовки РКН к пуску. Это можно выразить отношением

$$r_6 = \langle J, T, R_6 \rangle, \quad (4.6)$$

$$R_6 = \{ \langle j, \Delta t \rangle : (\langle j, d' \rangle \in R_3 \wedge \langle d, d' \rangle \in R_5 \wedge \langle l, d \rangle \in R_1 \wedge \langle l, \Delta t \rangle \in R_2) \}. \quad (4.7)$$

Возможность своевременного выполнения каждой работы с позиции обеспечения ее требуемыми специалистами можно описать следующим образом. В любой

момент времени  $t \in (0, \tau_n)$  количество требуемых специалистов  $d$ -й специализации  $\hat{y}_{d,t}$  не должно превышать располагаемого количества специалистов  $\hat{x}_{d,t}$ . Иными словами, должно выполняться неравенство

$$\hat{y}_{d,t} \leq \hat{x}_{d,t}, \quad (4.8)$$

где  $\hat{y}_{d,t}$  – величина, характеризующая потребность в специалистах  $d$ -й специализации в момент времени  $t \in (0, \tau_n]$ ;

$\hat{x}_{d,t}$  – величина, характеризующая возможность расчета обеспечить технологический процесс и процесс функционирования КУБ специалистами  $d$ -й специализации в момент времени  $t \in (0, \tau_n]$ ;

$\cap$  – символ случайной величины.

Объединенный расчет КУБ и штатного технологического процесса должен формироваться таким образом, чтобы в любой момент времени для любой потребной специальности выполнялось неравенство (4.8). Таким образом, критерий оценивания возможности обеспечения специалистами процесса подготовки с заданными показателями безопасности в формализованном виде можно записать следующим образом:

$$\bigcap_{d \in D} \bigcap_{t \in (0, \tau_n]} (\hat{y}_{d,t} \leq \hat{x}_{d,t}) = U,$$

где  $U$  – обозначение достоверного события.

Случайные величины  $\hat{y}_{d,t}, \hat{x}_{d,t}$  являются дискретными для  $\forall t \in (0, \tau_n]$  и, таким образом, характери-

зуются рядами распределений (табл. 4.1), отдельными для каждого  $d \in D$  и для каждого  $t \in (0, \tau_n]$ .

Таблица 4.1.

| $\hat{x}_{d,t}$ |             |             |             |     | $\hat{y}_{d,t}$ |             |             |             |     |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|-----|-----------------|-------------|-------------|-------------|-----|
| 0               | 1           | 2           | 3           | ... | 0               | 1           | 2           | 3           | ... |
| $P_0^{(y)}$     | $P_1^{(y)}$ | $P_2^{(y)}$ | $P_3^{(y)}$ | ... | $P_0^{(x)}$     | $P_1^{(x)}$ | $P_2^{(x)}$ | $P_3^{(x)}$ | ... |

Во многих случаях правомочно считать требуемое количество специалистов для выполнения работ на ТК и СК неслучайной величиной. Это обусловлено тем, что технология выполнения работ жестко задана в эксплуатационной документации и практически однозначно определяет, какие специалисты и в каком количестве должны выполнять работы. Кроме того, следует считать, что проведение работ в структуре КУБ также будет осуществляться штатным составом расчетов. Поэтому допустимо рассматривать в качестве критерия оценивания возможности обеспечения требуемыми специалистами единого процесса функционирования КУБ и подготовки РКН на заданном интервале времени истинность совокупности двухместных предикатов:

$$\bigcap_{d \in D} \bigcap_{\Delta t_n} (y_{d, \Delta t_n} \leq \hat{x}_{d, \Delta t_n}) = U,$$

где  $\Delta t_n$  - интервал времени планирования.

Если принять в качестве показателя эффективности процесса подготовки РКН к пуску вероятность достижения цели ТК и СК  $P_{ДЦ}$  в сформулированной постановке задачи, он совпадет с вероятностью обеспе-

ченности общего процесса функционирования КУБ и НТО ТК и СК специалистами  $P_{OC}$  и будет иметь вид:

$$P_{ДЦ} = P_{OC} = \text{Вер} \left( \bigcap_{d \in D} \bigcap_{\Delta t_n} (y_{d, \Delta t_n} \leq \hat{x}_{d, \Delta t}) \right). \quad (4.9)$$

Для расчета показателя эффективности по соотношению (4.9) необходимо разработать модель процесса подготовки РКН, в которой учитывалось использование специалистов для выполнения работ по технологии подготовки и работе КУБ. Примем следующие допущения:

1) специалисты одинаковых специальностей имеют одинаковую профессиональную пригодность к выполнению работ на ТК и СК;

2) система обучения специалистов обеспечивает постоянное повышение уровня их профессиональной пригодности по мере увеличения времени на обучение, вплоть до требуемого уровня;

3) причинами невозможности выполнения специалистами работ на ТК и СК являются болезнь, неплановые отпуск, командировка и т.д.

Для разработки модели необходимы исходные данные. Как показывает практика эксплуатации космических средств, всегда жестко заданы следующие данные:

1) комплекс работ процесса подготовки  $L$ , который определяется технологией подготовки РКН;

2) множество специальностей  $D$ , которыми должны владеть специалисты расчетов;

3) потребное количество специалистов различных специальностей для выполнения работ на ТК и СК, что

выражается отношением  $R_1$  (это отношение характеризует ресурсоемкость технологического процесса);

4) необходимость выполнения работ на ТК и СК в течение определенных промежутков времени, что выражается отношением  $R_2$  (оно характеризует оперативность технологического процесса);

5) множество промежутков времени  $T$ , в течение которых выполняются работы на ТК и СК;

6) программы обучения обслуживающего персонала НТО ТК и СК, а также КУБ.

Варьируемыми (управляемыми) параметрами являются:

1) количество обслуживающего персонала  $J$ ;

2) множество специальностей  $D'$ , которым обучены участники расчета подготовки и пуска РКН;

3) обученность обслуживающего персонала определенным специальностям (основным и смежным), что выражается отношением  $R$ ;

4) множество промежутков времени  $T_0$ , необходимых для подготовки специалистов КУБ, что определяется программами обучения;

5) соответствие специальностей, которыми владеют члены штатных технологических процессов, тем, которые необходимы для выполнения работ в структуре КУБ, что выражается отношением  $R_5$ ;

6) способность обслуживающего персонала овладеть специальностями в течение определенных промежутков времени, что выражается отношением  $R_4$ .

Таким образом,

$$P_{OC} = P_{OC}(J, D', R_3, T_0, R_4, R_5; L, D, R_1, R_2, T). \quad (4.10)$$

В рамках рассматриваемой задачи необходимо определить зависимость показателя эффективности техно-

логического процесса  $P_{ДЦ}$  от возможности расчетов обеспечить выполнение всех работ процесса подготовки и функционирования КУБ требуемыми специалистами. Поэтому искомым (оптимизируемым) параметром является отношение  $R = R' \cup R''$ , отражающее структуру и состав общего расчета (обученность членов расчетов основным технологическим ( $R'$ ) и смежным, потребным для КУБ ( $R''$ ), специальностям):

$$R = R' \cup R'', \quad R' \subseteq J \times D, \quad R'' \subseteq J \times D. \quad (4.11)$$

Введем обозначения:

$\Pi_{\langle 5 \rangle}^{III} = \langle L, D, R_1, R_2, T \rangle$  - вектор показателей свойств технологического процесса;

$\Pi_{\langle 7 \rangle}^{BP} = \langle J, D', R_3, T_0, R_4, R_5, R \rangle$  - вектор показателей свойств расчетов КУБ и технологического процесса.

Тогда выражение (4.10) примет вид

$$P_{OC} = P_{OC}(\Pi_{\langle 7 \rangle}^{BP}; \Pi_{\langle 5 \rangle}^{III}). \quad (4.12)$$

Конкретный вид выражения (4.12) зависит от распределения момента времени  $\hat{t}$  существования потребности в специалисте  $d$ -й специализации для отдельной работы  $l \in L$ , а также возможностей расчетов (их структуры и состава) по обеспечению требуемыми специалистами.

Возможность использования соответствующего специалиста для выполнения работы в интересах КУБ обусловлена, во-первых, его наличием на рабочем месте, во-вторых, его состоянием (возможностью выполнить свои функциональные обязанности в требуемый промежуток времени).



Таким образом, возможность расчета обеспечить общий технологический процесс в любой момент времени  $t \in (0, \tau_n]$  специалистом  $d$ -й специализации можно записать в виде:

$$\exists (t, j, d) : ((t \in \Delta t) \wedge (\langle j, \Delta t \rangle \in R_6) \wedge (\langle d, d' \rangle \in R_5) \wedge (\langle j, d' \rangle \in R_3)).$$

Потребность в специалисте может существовать в течение какого-либо промежутка времени  $\Delta t$ , необходимого для выполнения работы.

Формально это может быть записано следующим образом:

$$\exists (l, d, \Delta t) : ((t \in \Delta t) \wedge (\langle l, d \rangle \in R_1) \wedge (\langle l, \Delta t \rangle \in R_2)).$$

В общем случае  $\Delta \hat{t} : (\Delta \hat{t} \in T, \langle l, \Delta \hat{t} \rangle \in R_2)$  носит случайный характер, выражающийся в случайном характере времени начала работы (потребности в специалисте)  $\hat{t}^{(H)}$ , продолжительности работы (этой потребности)  $\Delta \hat{t}$  и момента окончания работы (прекращения потребности в специалисте)  $\hat{t}^{(K)}$ .

Из практики эксплуатации НТО ТК и СК известно, что для каждой работы процесса подготовки РКН можно указать раннее и позднее окончание. Поэтому можно сделать вывод, что закон распределения момента времени возникновения потребности в специалисте является усеченным:

$$\varphi_z^n(t) = \begin{cases} 0 & \text{npu} & t < t_p^{(H)}, \\ c \varphi_t^n(t) & \text{npu} & t_p^{(H)} \leq t \leq t_n^{(K)}, \\ 0 & \text{npu} & t > t_n^{(K)}. \end{cases}$$

При планировании работ обычно рассматривают не конкретный момент  $t$ , а некоторый интервал времени планирования  $\Delta t_n = [t_p^*, t_n^*]$ , в течение которого потребность в специалисте считается постоянной. Для таких случаев плотность распределения  $\varphi_i^n(t)$  имеет вид, представленный на рис.4.9.

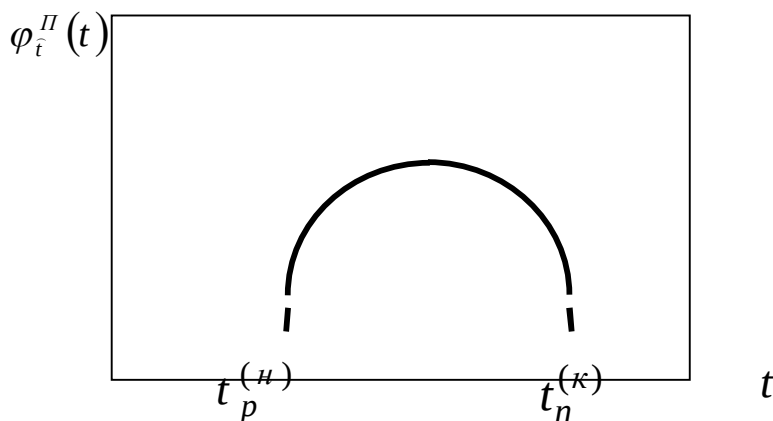


Рис. 4.9

Тогда вероятность того, что в период времени  $\Delta t_n$  будет существовать единичная потребность для отдельной работы  $l \in L$  в специалисте  $d$ -й специализации, будет равна:

$$P_{\langle l, d \rangle}(t_\delta^* \leq \hat{t} \leq t_i^*) = \int_{t_\delta^*}^{t_i^*} \varphi_z^i(t) dt. \quad (4.13)$$

В практике планирования работ по подготовке РКН могут встречаться различные соотношения между моментами времени  $t_p^*, t_n^*, t_p^{(H)}, t_n^{(K)}$ . Наиболее реальными являются следующие:

1. Интервал планирования включает

$$[t_p^{(H)}, t_n^{(K)}]: (t_p^* \leq t_p^{(H)}) \wedge (t_n^* \geq t_n^{(K)}), \quad (4.14)$$

$$\text{тогда } P_{\langle l, d \rangle}(t_p^* \leq \hat{t} \leq t_n^*) = \int_{t_p^*}^{t_n^*} c \varphi_{\bar{z}}^n(t) dt = 1. \quad (4.15)$$

2. Интервал планирования не включает

$$[t_p^{(H)}, t_n^{(K)}]: (t_n^{(K)} \leq t_p^*) \vee (t_p^{(H)} \geq t_n^*), \quad (4.16)$$

$$\text{тогда } P_{\langle l, d \rangle}(t_p^* \leq \hat{t} \leq t_n^*) = \int_{t_p^*}^{t_n^*} c \varphi_{\bar{z}}^n(t) dt = 0. \quad (4.17)$$

3. Интервал планирования частично включает

$$[t_p^{(H)}, t_n^{(K)}]: (t_p^* = t_p^{(H)}) \wedge (t_n^{(K)} > t_n^*), \quad (4.18)$$

тогда

$$P_{\langle l, d \rangle}(t_p^* \leq \hat{t} \leq t_n^*) = \frac{\int_{t_p^*}^{t_n^*} \varphi_{\bar{z}}^n(t) dt}{\int_{t_p^{(H)}}^{t_n^{(K)}} \varphi_{\bar{z}}^n(t) dt} = \frac{F_{\bar{t}}(t_n^*) - F_{\bar{t}}(t_p^*)}{F_{\bar{t}}(t_n^{(K)}) - F_{\bar{t}}(t_p^{(H)})}, \quad (4.19)$$

$$\text{при } F_t^d(t_p^*) = 0; \quad F_t^d(t_p^{(n)}) = 0, \quad (4.20)$$

$$P_{\langle l, d \rangle}(t_p^* \leq \hat{t} \leq t_n^*) = \frac{F_{\hat{t}}(t_n^*)}{F_{\hat{t}}(t_n^{(k)})}. \quad (4.21)$$

Пусть  $\varphi_{\hat{t}}^B(t)$  - плотность распределения момента времени  $\hat{t}$  отсутствия возможности для  $j$ -го специалиста выполнить свои функциональные обязанности (выполнить работу по  $d$ -й специальности).

Тогда, рассматривая функциональные возможности сотрудников общего расчета на интервалах времени планирования, получим вероятность отсутствия возможности в период времени  $[t_p^*, t_n^*]$   $j$ -му сотруднику общего расчета выполнить работу, требующую  $d$ -й специализации:

$$Q_d^{(j)}(t_p^* \leq \hat{t} \leq t_n^*) = \int_{t_p^*}^{t_n^*} \varphi_{\hat{t}}^B(t) dt. \quad (4.22)$$

Соответственно вероятность  $P_d^{(j)}$  существования возможности у  $j$ -го специалиста в период времени  $\Delta t_n$  выполнить работу, требующую  $d$ -й специализации, будет вычисляться следующим образом:

$$P_d^{(j)} = 1 - Q_d^{(j)}(t_p^* \leq \hat{t} \leq t_n^*) = 1 - \int_{t_p^*}^{t_n^*} \varphi_{\hat{t}}^B(t) dt. \quad (4.23)$$

От значений  $[t_p^*, t_n^*]$  будет зависеть перечень учитываемых причин отсутствия специалистов на рабочих местах.

Предложенная модель позволяет определять возможности общего расчета по обеспечению выполнения технологического процесса и работы в структуре КУБ. Кроме того, модель позволяет обосновывать решения по освоению специалистами смежных специальностей в интересах нового образования – КУБ. На основании модели можно будет оценивать влияние принятого решения о структуре и составе расчетов выполнения технологического процесса и работы в структуре КУБ на эффективность процесса подготовки РКН. Конкретный вид выражений для вычисления вероятности наличия специалиста в составе общего расчета и возможности для каждого сотрудника расчета выполнить работу зависит от соответствующих законов распределения. Модель позволяет разработать метод распределения обслуживающего персонала расчета по смежным специальностям для КУБ и технологического процесса.

Выше были введены отношения, характеризующие заданные и управляемые параметры технологического расчета и расчета КУБ. Среди управляемых параметров в соответствии с поставленной задачей можно выделить отношение  $R$  (выражение (4.6)), которое характеризует способ формирования общего расчета, состоящего из специалистов требуемых специальностей. Результаты общей работы по подготовке и пуску РКН во многом зависят от того, каким образом сформированы расчет КУБ и технологический расчет и обеспечена ли каждая работа требуемым специалистом. Операцию в обоих расчетах должны выполнять  $m$  специалистов, что означает выполнение  $m$  работ.

Для того чтобы охарактеризовать зависимость результатов подготовки РКН от свойств расчетов, рассмотрим событие  $\hat{A}_1$ , заключающееся в обеспечении

выполнения всех работ  $l \in L$  необходимыми специалистами:

$$\widehat{A}_1 = \bigcap_{d \in D} \bigcap_{\Delta t_n}^d (y_{d, \Delta t_n} \leq \widehat{x}_{d, \Delta t_n}). \quad (4.24)$$

Для получения целевого эффекта подготовки РКН с соблюдением требуемого уровня безопасности необходимо выполнить все работы  $l \in L$ , то есть обеспечить оба расчета специалистами требуемых специальностей. Поэтому событие  $\widehat{A}_1$  является сложным:

$$\widehat{A}_1 = \widehat{B}_1 \cap \widehat{B}_2 \cap \dots \cap \widehat{B}_l = \bigcap_{l=1}^{v_1} \widehat{B}_l, \quad v_1 = \text{card } L, \quad (4.25)$$

где  $\widehat{B}_l$  - событие, заключающееся в обеспечении отдельной работы  $l \in L$  необходимым специалистом;  $\text{card } L$  - мощность множества  $L$ .

Рассмотрим подмножество  $J_l \subset J$ , в которое входят номера расчетов, способные удовлетворить потребность работы  $l \in L$  в специалисте:

$$J_l = \{j : (\langle l, d \rangle \in R_1 \wedge \langle d, d' \rangle \in R_5 \wedge \langle j, d' \rangle \in R_3)\}. \quad (4.26)$$

Отметим, что подмножество  $J_l$  представляет собой фактор-множество (правое сечение  $S_{II}$  по графику  $R_3$ ):

$$J_l \equiv S_{II}(d', R_3) = \{j : (\langle j, d' \rangle)\} = \frac{J}{R_3} \quad (4.27)$$

Обозначим через  $\widehat{B}_l^j$  событие, заключающееся в обеспечении работы  $l$  специалистом  $j \in J_l$ . Тогда

$$\widehat{B}_l = \bigcup_{j=j'}^{j''} \widehat{B}_l^{(j)}, \quad (4.28)$$

$$\widehat{A}_1 = \bigcap_{l=1}^{v_1} \left( \bigcup_{j=j'}^{j''} \widehat{B}_l^{(j)} \right); \quad j', j'' \in J_l. \quad (4.29)$$

Если  $j'=j''$ , то существует единственный  $j$ -й сотрудник общего расчета, способный удовлетворить потребность отдельной работы или группы работ  $l \in L$  в специалисте. В этом случае  $\widehat{B}_l = \widehat{B}_l^{(j)}$  и

$$\widehat{A}_1 = \bigcap_{l=1}^{v_1} \widehat{B}_l = \bigcap_{j=1}^u \widehat{B}_l^{(j)}. \quad (4.30)$$

В основу формирования общего расчета могут быть положены различные стратегии, связанные с полной или частичной взаимозаменяемостью его номеров или с отсутствием взаимозаменяемости. Для описания степени взаимозаменяемости номеров общего расчета введем отношение  $r_7$ :

$$r_7 = \langle J, L, T, R_7 \rangle, \quad R_7 \subseteq J \times L \times T. \quad (4.31)$$

Если общий расчет формируется таким образом, что каждый его номер может выполнить одну или несколько работ и при этом ни один из других номеров общего расчета не может выполнить эти работы, то можно говорить о том, что в обоих расчетах полностью отсутствует взаимозаменяемость его сотрудников (номеров).

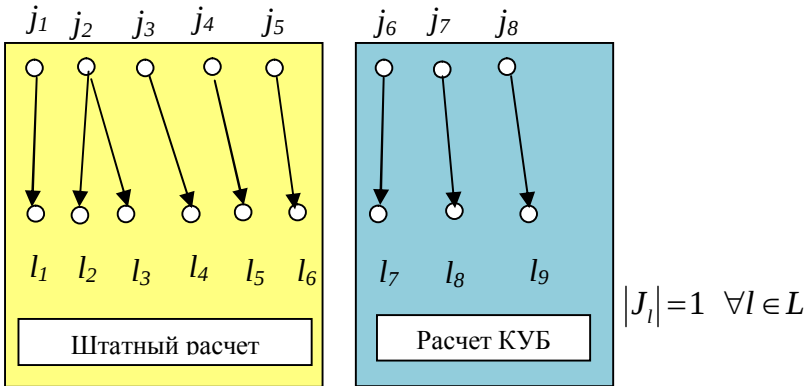
Пусть  $\widehat{B}^{(j)}$  - событие, заключающееся в обеспечении отдельной работы или совокупности работ  $l \in L$  специалистом  $j$ . Если взаимозаменяемость специалистов отсутствует и каждый специалист в расчетах явля-

ется единственным, кто может выполнить какую-либо работу, то выполняется условие:

$$\exists (j, j^* \in J) : (\langle j, l, \Delta t \rangle, \langle j^*, l, \Delta t \rangle \in R_7),$$

$$\text{то } \hat{A}_1 = \bigcap_{j=1}^u \hat{B}^{(j)}. \quad (4.32)$$

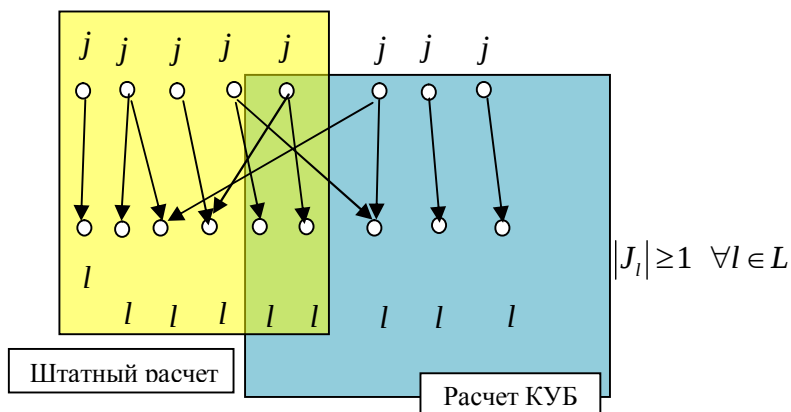
На рис. 4.10 а, б приведены различные варианты отношения  $r_7$ , демонстрирующие степень взаимозаменяемости номеров объединенного расчета.



Без взаимозаменяемости

Рис. 4.10 а. Варианты формирования объединенного расчета без взаимозаменяемости обслуживающего персонала





Расчеты с взаимозаменяемостью

Рис. 4.10 б. Варианты формирования объединенного расчета с учетом взаимозаменяемости обслуживающего персонала

Из соотношения (4.6) вытекает справедливость соотношений:

$$P(\hat{A}_1) = P(\hat{B}_1) \cdot P(\hat{B}_2 / B_1) \dots P(\hat{B}_{v_1} / B_1 \cap \dots \cap B_{v_1-1}), \quad (4.33)$$

$$P(\hat{B}_l \cap \hat{B}_{l'}) = P(\hat{B}_l) \cdot P(\hat{B}_{l'} / B_l), \quad (4.34)$$

если  $\exists (j \in J) : (\langle j, l', \Delta t' \rangle, \langle j, l'', \Delta t'' \rangle \in R_7)$ .

Выражение (4.9) показывает, что в объединенном расчете предусмотрена возможность взаимозаменяемости обслуживающего персонала для выполнения работ в непересекающиеся промежутки времени. Таким образом,  $P(\hat{A}_1)$  является показателем возможностей объединенного расчета обеспечивать процессы подготовки РКН специалистами.

Если в объединенном расчете не предусмотрена взаимозаменяемость специалистов, то

$$P(\widehat{B}^{(j')} \cap \widehat{B}^{(j'')}) = P(\widehat{B}^{(j')}) \cdot P(\widehat{B}^{(j'')} / \widehat{B}^{(j')}) . \quad (4.35)$$

Выше было отмечено, что специалист расчета может отсутствовать на рабочем месте в некоторые промежутки времени. Отсутствие сотрудников расчета  $j \in J$  на своих рабочих местах в дискретные промежутки времени  $\Delta t \in T$  возникновения потребности в них носит случайный характер (болезнь, травма, вызов по служебной необходимости, неплановые отпуск, командировка и т.д.). Это можно выразить через отношение

$$r_8 = \langle J, T, R_8 \rangle, \quad R_8 \subseteq J \times T. \quad (4.36)$$

Сравнивая с выражениями (4.6) и (4.7), отметим, что

$$\langle j, \Delta t \rangle \in R_8 \Rightarrow \langle j, \Delta t \rangle \notin R_6.$$

Таким образом, невозможность обеспечения работы  $l$  специалистом  $j$  можно описать следующим образом. Обозначим  $V$  - невозможное событие,  $U$  - достоверное событие.

Тогда если

$$\exists \langle j, \Delta t \rangle \in R_8 : \langle j, d' \rangle \in R_3 \wedge \langle d, d' \rangle \in R_5 \wedge \langle l, d \rangle \in R_1 \wedge \langle l, \Delta t \rangle \in R_2),$$

то  $\widehat{B}_l^j = V$ .

Невозможность обеспечения процесса подготовки специалистами формально описывается так:  $\widehat{A}_1 = V$ , если

$$\exists (l \in L) : (\forall j \in J_l, \langle j, l, \Delta t \rangle \in R_7 \wedge \langle j, \Delta t \rangle \in R_8). \quad (4.37)$$

Введем в рассмотрение подмножество  $J_l^I \subseteq J_l$ , в состав которого входят участники расчета, которые имеют возможность выполнить работу  $l$  в дискретный

промежуток времени  $\Delta t$  (т.е. не заняты в выполнении других работ и находятся на рабочих местах). Если при проведении работ по подготовке и пуску РКН возможна такая ситуация, что номер расчета  $j$ , имеющий соответствующую специальность, должен одновременно выполнять две работы  $l'$  и  $l''$ , причем он является единственным в составе объединенного расчета, способным выполнить эти работы, то он не может принадлежать к подмножествам  $J_{l'}^I$  и  $J_{l''}^I$ . Иными словами, эти подмножества не пересекаются. Формально это записывается следующим образом:

если

$$\exists(\Delta t \in T; l', l'' \in L): (\langle j, l', \Delta t \rangle \in R_7) \wedge (\langle j, l'', \Delta t \rangle \in R_7), \quad (4.38)$$

$$\text{то } (j \in J_{l'}^I) \wedge (j \in J_{l''}^I) = V, \quad (j \in J_{l'}^I) \vee (j \in J_{l''}^I) = U. \quad (4.39)$$

В противном случае, т.е. если в любой момент времени номер расчета  $j$  может быть задействован для выполнения только одной работы, он может принадлежать и к подмножеству  $J_{l'}^I$ , и к подмножеству  $J_{l''}^I$ . Формально это записывается так:

если

$$\exists(\Delta t \in T; l', l'' \in L): (\langle j, l', \Delta t \rangle \in R_7 \wedge \langle j, l'', \Delta t \rangle \in R_7), \quad (4.40)$$

$$\text{то } (j \in J_{l'}^I) \wedge (j \in J_{l''}^I) = U. \quad (4.41)$$

В этом случае объединенный расчет можно формировать из специалистов, которые могут выполнять два и более видов работ, т.е. возможна взаимозаменяемость специалистов. Если для любого номера объединенного расчета определенной специальности, который способен выполнить работы  $l'$  и  $l''$ , не возникает ситуация, при которой он должен эти работы выполнять одновременно (в один и тот же промежуток времени),

что невозможно по условиям задачи, то он может войти в оба подмножества  $J_{l'}^I$  и  $J_{l''}^I$ . Формально это записывается следующим образом:

$$(\forall j \in J_{l'}^I, J_{l''}^I \wedge \forall l \in \{l', l''\}): ((j \in J_{l'}^I) \wedge (j \in J_{l''}^I)). \quad (4.42)$$

Иными словами, можно агрегировать работы процесса подготовки РКН в расчете КУБ и в штатном технологическом расчете с точки зрения обеспечения их требуемыми специалистами, то есть вместо двух работ рассматривать только одну:

$$l^* = l' \cup l'', \quad J_{l^*}^I = J_{l'}^I \cup J_{l''}^I. \quad (4.43)$$

Таким образом, для того чтобы обеспечить работу  $l$  требуемым специалистом с учетом возможности агрегирования работ и взаимозаменяемости специалистов, необходимо, чтобы подмножество специалистов  $J_l^I$  обладало следующим свойством. Количество специалистов, способных выполнить работу  $l$  (это мощность подмножества  $J_l^I$ ), должно быть равным или превышать то количество специалистов, которое в промежуток времени  $\Delta t$ , определенный для выполнения работы  $l$ , задействовано для выполнения работ в КУБ. В этом случае можно говорить об обеспеченности работы  $l$  требуемым специалистом. Формально это выглядит так:

$$\begin{aligned} & ((\text{card } J_l^I - \text{card } \{j : (j \in J_l^I \wedge \langle j, \Delta t \rangle \in R_8)\}) > 0) \cup \\ & \cup (\text{card } \{j : (j \in J_l^I \wedge \langle j, \Delta t \rangle \in R_6)\} > 0) \Rightarrow \\ & \Rightarrow (y_{d, \Delta t} \leq \bar{x}_{d, \Delta t}) \wedge (\langle l, d \rangle \in R_1) \Rightarrow \bar{B}_l^j = U. \end{aligned} \quad (4.44)$$

Дизъюнкция выражений (4.44) по всем работам дает возможность описать событие  $\hat{A}_1$ , заключающееся в обеспечении всех работ необходимыми специалистами.

С учетом вышесказанного соотношение (4.29) можно представить в виде:

$$\widehat{A} = \bigcap_{l=1}^{v_l} \left( \bigcup_{j \in J_l^I} \widehat{B}_l^j \right).$$

Влияние расхода ресурса времени на обучение специалистов обоих расчетов учитывается через отношения  $r_4, r_3, r_5, r_1$ , так как

$$\begin{aligned} & \langle j, d' \rangle \in R_3 : (\langle j, d', \Delta t_0 \rangle \in R_4), \\ & \langle j, l, \Delta t \rangle \in R_7 : \\ & \left( \langle j, d' \rangle \in R_3 \wedge \langle d, d' \rangle \in R_5 \wedge \langle l, d \rangle \in R_1 \wedge \right. \\ & \left. \wedge \langle j, \Delta t \rangle \notin R_8 \right). \end{aligned}$$

Таким образом, вероятность наступления события  $\widehat{A}_1$  выражается следующим образом:

$$\begin{aligned} P(\widehat{A}_1) &= \prod_{J_l^I} P\left(\text{card}\{j : (j \in J_l^I \wedge \langle j, \Delta t \rangle \in R_6)\} > 0\right) \\ &\text{или} \\ P(\widehat{A}_1) &= \prod_{J_l^I} P\left(\text{card } J_l^I > \text{card}\{j : (j \in J_l^I \wedge \langle j, \Delta t \rangle \in R_8)\}\right). \end{aligned}$$

В этом выражении не учитывается воздействие неблагоприятных факторов на каждого номера объединенного расчета. К ним относятся, например, возможность заболевания, получения травмы, привлечения для выполнения других работ в связи с экстренными или иными обстоятельствами и т.д. Тогда

$$P\left(\bigcap_{j \in J_l^I} (y_{d, \Delta t} \leq \widehat{x}_{d, \Delta t}) / \langle j, d \rangle \in R_1\right) = 1 - \prod_{q=1}^{\text{card } J_l^I} (1 - P_q),$$

где  $P_q$  – вероятность сохранения возможности для  $q$ -го члена объединенного расчета выполнить свою работу.

С учетом соотношений (4.1) – (4.5), (4.24) – (4.31) и введенных ранее понятий

$$P(\hat{A}_1) = \prod_{u=1}^{card\{J_l^I\}} \left[ 1 - \prod_{q=1}^{card J_l^I} (1 - P_{qu}) \right], \quad (4.45)$$

где  $card\{J_l^I\} = v_1$  – количество работ по подготовке РКН.

С учетом соотношений (4.35), (4.45) вероятность обеспечения процесса подготовки РКН специалистами объединенного расчета можно записать следующим образом:

$$P(\hat{A}) = \prod_{u=1}^{card\{J_l^I\}} \left[ 1 - \prod_{q=1}^{card J_l^I} (1 - P_{qu}) \right] \cdot P(\hat{A}_2 | A_1) = P_{OC}. \quad (4.46)$$

Анализ выражения (4.46) позволяет определить основные пути повышения показателя эффективности работы расчетов за счет совершенствования их свойств:

- 1) агрегирование работ объединенного расчета путем обеспечения возможности выполнения различных работ одним специалистом, т.е. снижение величины  $card\{J_l^I\}$ ;
- 2) освоение номерами объединенного расчета смежных специальностей, что позволит создать резерв специалистов, способных выполнять различные работы по штатной технологии и в структуре КУБ, т.е. увеличение значения величины  $card J_l^I$ ;

3) улучшение условий выполнения работ и организации их проведения, т.е. увеличение значения величины  $P_{qi}$ .

Реализация первого и второго путей составляет основу графоаналитического метода формирования структуры и состава расчета КУБ.

Снижение  $card \{J_l^I\}$  возможно на основе процедуры агрегирования работ  $l \in L$ . Понятие об агрегировании работ было введено ранее (см. выражения (4.40)÷(4.43)).

Второй путь приоритетен по времени в процессе обучения обслуживающего персонала, так как при его реализации создается резерв специалистов.

После создания резерва специалистов вопрос об его использовании может решаться соответствующими должностными лицами отдельно.

Рассмотрим процедуру определения резерва специалистов объединенного расчета. Минимальное значение  $card \{J_l^I\}$  определяется отношениями  $r_1, r_2, r_3, r_5$  и соответствует при  $card J_l^I = 1, \forall l \in L$  минимальному числу специалистов, способных выполнить весь комплекс работ  $L$ .

Для разработки процедуры определения минимального количества обслуживающего персонала и резерва специалистов представим модель объединенного расчета в виде смешанного мультиграфа  $G$  (рис.4.11), где вершины графа  $j_i \in \{j_i\}$  идентифицируют соответствующих участников расчета.

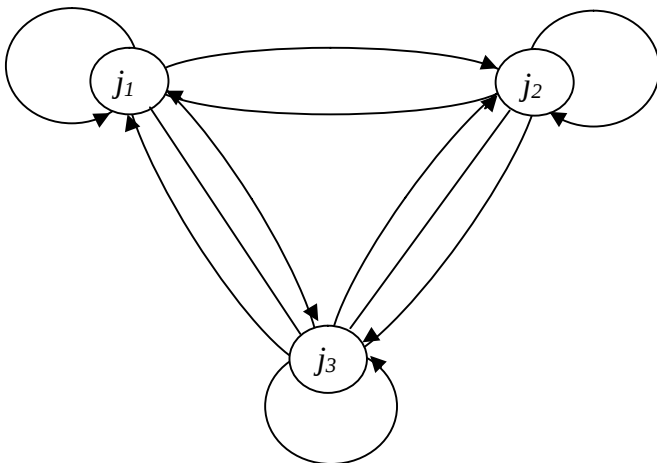


Рис. 4.11. Граф, характеризующий структуру объединенного расчета

Граф  $G$  имеет ребра трех видов. В соответствии с видами ребер существуют три части (субграфы) графа  $G : G_1$  (рис.4.12),  $G_2$  (рис.4.13),  $G_3$  (рис.4.14).

В графе  $G_1$  (рис. 4.12) вершины  $j_i, j_{i+k}$  соединены неориентированным ребром, если для идентифицируемых участников расчета  $j_i \rightarrow j', j_{i+k} \rightarrow j''$  выполнено условие:

$$\exists (\Delta t \in T; l', l'' \in L) : ((\langle j', l', \Delta t \rangle \in R_7) \wedge (\langle j'', l'', \Delta t \rangle \in R_7)). \quad (4.47)$$



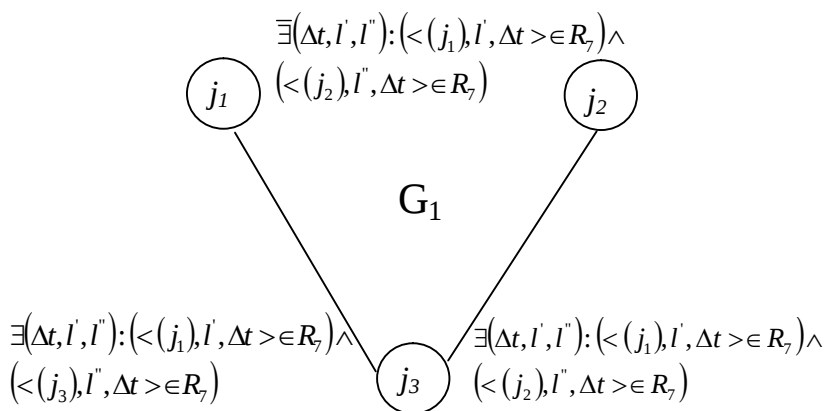


Рис. 4.12. Суграф  $G_1$ , характеризующий возможность взаимозаменяемости номеров расчетов

В графе  $G_2$  (рис. 4.13) каждое ребро является петлей с весом, характеризующим затраты на обучение идентифицируемого участника расчета специальности. Понятие специальности вводится с целью сокращения количества исходной информации при формировании структуры и состава расчета и является реализацией следующего допущения: выделенный состав расчета  $(R_3^0)$  достаточен для проведения всего комплекса работ  $L$ , и существует исходный план проведения указанных работ с учетом распределения специалистов  $(R_7^0)$ .

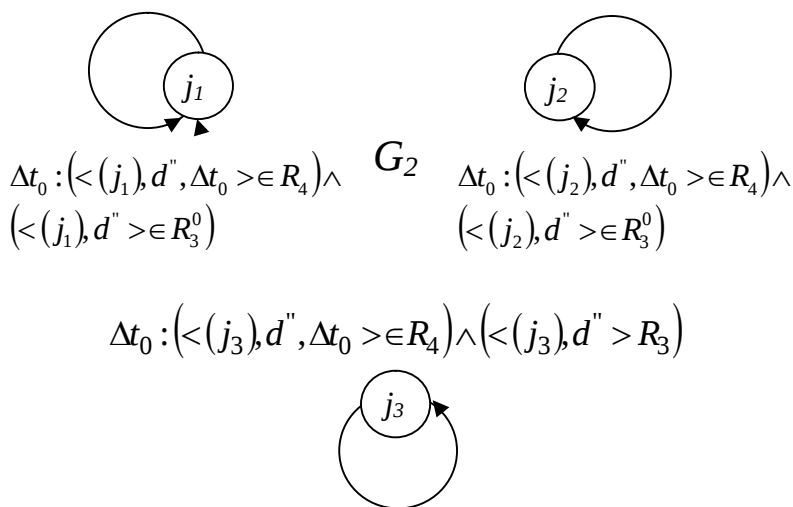


Рис.4.13. Суграф  $G_2$ , характеризующий затраты на обучение номеров расчета основным специальностям

Специальностью участника расчета  $j$  будем называть

$$d' : ((\langle j, d' \rangle \in R_3^0) \wedge (\langle j, l, \Delta t \rangle \in R_7^0)) . \quad (4.48)$$

Таким образом, с учетом выражения (4.48) специальность  $d'$  можно ставить в соответствие с  $\langle l, \Delta t \rangle \in R_2$ .

В графе  $G_3$  (рис. 4. 14) вершины  $j_i, j_{i+k}$  соединены ориентированным ребром (дугой) с весом, характеризующим затраты на обучение участника расчета, имеющего первичную специальность  $(j_i)$ , специальности  $(j_{i+k})$ .

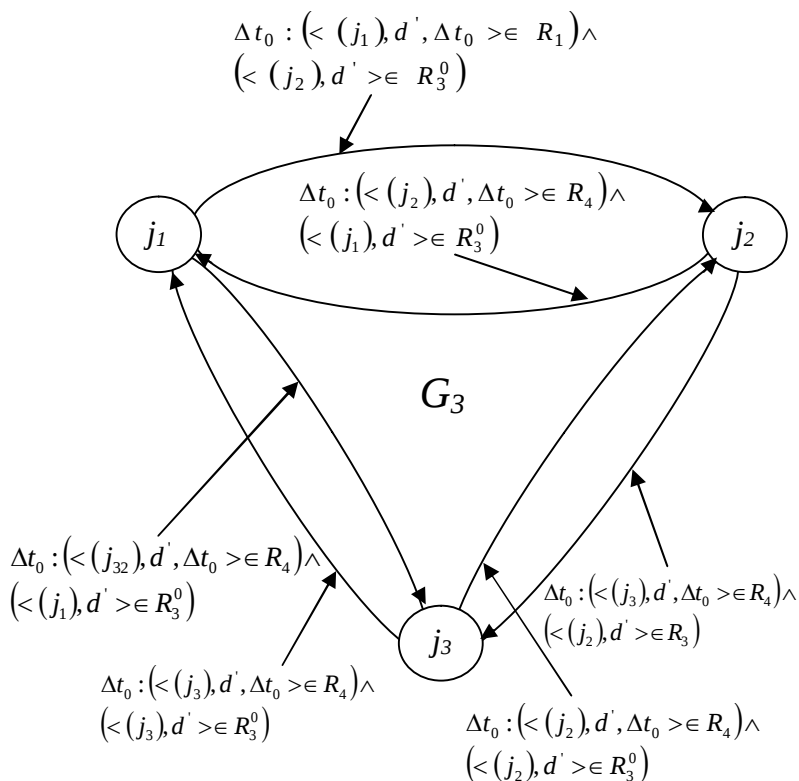


Рис. 4.14. Суграф  $G_3$ , характеризующий затраты на освоение специалистами смежных специальностей

Затраты на обучение в соответствии с соотношениями (4.4) и (4.48) характеризуются временем  $\Delta t_0$  (рис. 4.13, 4.14).

Из сопоставления выражения (4.47) с (4.37)÷(4.41) следует, что отсутствие неориентированного ребра между  $j_i, j_{i+k}$  означает для участников расчета

$(j_i \rightarrow j', j_{i+k} \rightarrow j'')$  возможность нахождения в одной группе  $J_l^I$ , а наличие ребра – отсутствие такой возможности.

Для определения целесообразного варианта распределения обслуживающего персонала по специальностям необходимо определить зависимость показателя обеспеченности общего процесса подготовки РКН специалистами расчетов от конкретных реализаций отношения  $R$ , сформулировать задачу распределения технологического расчета и расчета КУБ по смежным специальностям и обосновать метод ее решения. Такая задача имеет следующую постановку:

Дано:  $L, D, T, R_1, R_2, J, D', T_0, R_3, R_4, R_5, R', \{P_{qj}, j \in J\}$ .

Найти:

$$R'' = \arg \max_{R'' \in R^{\text{don}}} \left[ P_{OC} \left( L, D, T, R_1, R_2, J, D', T_0, R_3, R_4, R_5, R', \{P_{qj}, j \in J\}, \{\Delta t_{oj}^{\partial}\} \right) \right],$$

где  $\Delta t_{oj} = \sum_{i \in S_{\Lambda}(j, R''_{\text{don}})} \Delta t_{oi} \leq \Delta t_{oj}^{\partial}, \forall j \in J, S_{\Lambda}(j, R''_{\text{don}})$  - левое

сечение множества  $J$  по графику  $R$ .

Множество вероятностей присутствия номеров расчетов на рабочих местах  $\{P_{qj}, j \in J\}$  рассчитывается по соотношениям (4.13)÷(4.23). Поставленная задача относится к классу комбинаторных задач. Для её решения целесообразно использовать метод ветвей и границ [139]. Пример решения этой задачи методом ветвей и границ при условии, что каждый специалист может овладеть только одной смежной специальностью, приведен в [140].

## **4.2. Организационно-техническая структура управления безопасностью**

КУБ, как и всякая система управления с точки зрения ее функционирования, решает три основные задачи: сбор и передача информации об управляемом объекте, переработка информации и выдача управляющих воздействий на объект управления. Несмотря на то что объектами управления для КУБ являются, с одной стороны, коллективы обслуживающего персонала, управление которыми осуществляется посредством передачи информации в виде документов, а с другой – технологическое оборудование ТК и СК и технологический процесс подготовки РКН к пуску, в основе управления которыми лежит передача информации в виде различных сигналов (электрических, световых, механических и др.), КУБ должен представлять собой единую интегрированную систему управления. Главной целью КУБ должны стать автоматизация информационных процессов обеспечения безопасности на ТК и СК и усовершенствование формы и организации их выполнения.

Структурная схема КУБ представлена на рис. 4.15. Создание КУБ должно привести к тому, что информационным процессам по вопросам безопасности, их организации, проектированию, подготовке и выполнению будет уделяться такое же внимание, как технологическим процессам.



Рис. 4.15.

В структуре управления безопасностью ТК и СК возникает специальное подразделение – информационно-вычислительный центр (ИВЦ), ответственный за упорядочение, регламентацию и непосредственное выполнение информационных процессов на ТК и СК. Функциональные подсистемы непосредственно выполняют функции управления безопасностью. Такими функциями являются: конструкторско-технологическая подготовка технологических операций на ТК и СК, техническая подготовка технологического процесса, снабжение, комплектация, планирование, финансовые операции, экономический анализ, учет кадров и т. д.

Известно [141], что агрегативные связи в больших комплексах управления, подобных КУБ, могут быть достаточно разнообразными. Для них можно выделить следующие основные классы структур систем с позиций управления. Такими структурами могут быть:

- децентрализованная;
- централизованная;
- централизованная рассредоточенная;
- иерархическая.

Наиболее распространенной в настоящее время является иерархическая структура с двумя уровнями управления, которую иногда называют централизованной структурой с автономным управлением. Вариант такой системы управления для КУБ представлен на рис. 4.16. Особенностью такой структуры является сочетание централизованного управления комплексом с локальным управлением отдельными объектами.

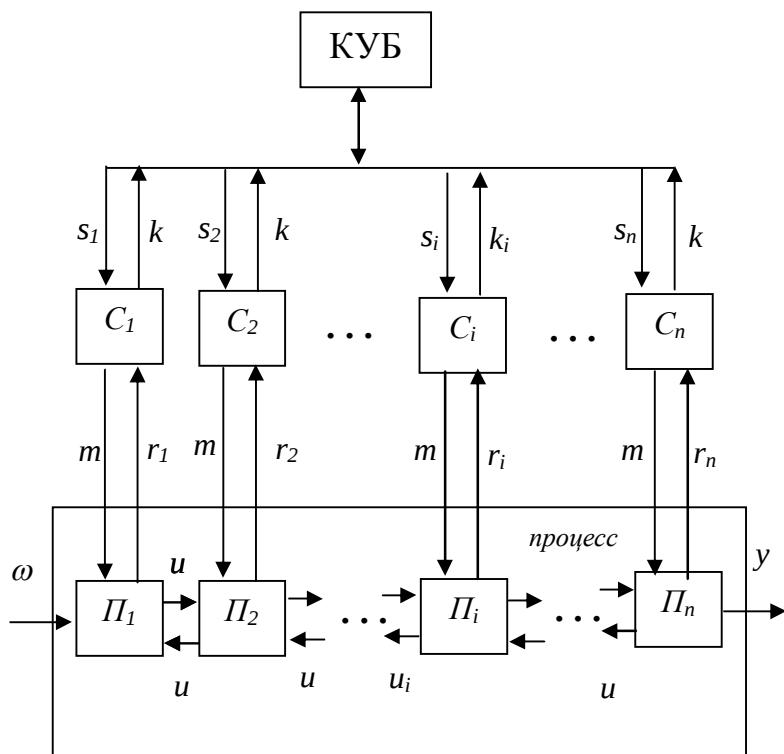


Рис. 4.16. Иерархическая структура КУБ с двумя уровнями управления безопасностью (вариант)

$C_i$  – управляющие системы;  $\Pi_i$  – подпроцессы управляемого процесса;  $\omega$  – множество внешних воздействий;  $m$  – множество управляющих сигналов;  $r$  – множество информационных сигналов;  $s$  – множество координирующих сигналов;  $k$  – множество информационных сигналов второго уровня;  $y$  – множество выходных сигналов



Таким образом, функции управления разделены между центральным органом, который реализует алгоритм глобального управления комплексом, и локальными органами, каждый из которых решает задачи управления некоторым подмножеством объектов в соответствии с управляющим воздействием центрального органа. В этой структуре сочетаются многие положительные функциональные свойства полностью централизованной рассредоточенной структуры, среди них:

1) максимальная автономность локальных центров в процессе управления с возможностью оптимального управления комплексом в целом;

2) централизованное хранение и обработка информации, относящейся ко всему комплексу в целом, с децентрализованным размещением и обработкой информации, необходимой для автономного управления отдельными объектами;

3) пониженные требования к пропускной способности и производительности локальных органов управления с высокой пропускной способностью комплекса;

4) комплекс обладает повышенной надежностью, так как при выходе из строя центрального органа локальные центры управления могут продолжать функционировать, например, в соответствии с последним централизованным управляющим воздействием.

Такая архитектура КУБ содержит вышестоящую управляющую систему,  $n$  нижележащих управляющих систем ( $C_i$ ) и управляемый процесс. В комплексе выделены два вида вертикального взаимодействия между подсистемами. Один – это передача вниз командных сигналов: сигналов от управляющих систем к управляемому процессу (управляющее воздействие), сигналов от

вышестоящего комплекса к нижестоящим управляющим системам (координирующее воздействие или вмешательство).

Так как системы нижнего уровня управления могут иметь различные локальные цели и, следовательно, находиться в конфликтных ситуациях, то задача координации для комплекса состоит в воздействии на нижестоящие системы таким образом, чтобы достигалась общая цель, заданная для всего комплекса в целом.

Другой вид вертикального взаимодействия – это передача информационных сигналов или сигналов обратной связи различным управляющим системам иерархии. Такой вид взаимодействия обеспечивает возможность того, что любая управляющая подсистема имеет сведения о ходе протекания самого процесса в объекте управления и о качестве управления.

Для составления модели функционирования двухуровневого комплекса управления безопасностью на языке теории множеств введем следующие обозначения:

$m \in M$  – множество управляющих сигналов;

$\omega \in \Omega$  – множество внешних воздействий;

$r \in R$  – множество информационных сигналов первого уровня;

$s \in S$  – множество координирующих сигналов;

$y \in Y$  – множество выходных сигналов;

$k \in K$  – множество информационных сигналов второго уровня.

Управляемый процесс задается отображением

$$П: M \times \Omega \rightarrow Y,$$

где  $M = M_1 \times M_2 \times \dots \times M_i \times \dots \times M_n$  и  $M_i$  – множество управляющих сигналов для  $i^{co}$  управляющего органа  $[m_i \in M_i, \bar{m} = (m_1, m_2, \dots, m_n)]$ .

Модель функционирования  $i^{\text{н}}$  локальной системы управления ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) реализуется в виде отображения

$$C_i : S \times R_i \rightarrow M_i; R = R_1 \times R_2 \times \dots \times R_i \times \dots \times R_n.$$

Модель координатора выглядит как

$$КУБ : K \rightarrow S.$$

Соответственно информационные обратные связи первого и второго уровней реализуются отображениями:

$$f_i : M_i \times \Omega \times Y \rightarrow R_i; i = 1, 2, \dots, n,$$

$$f_0 : S \times R \times M \rightarrow K.$$

При анализе особенностей функционирования и принципов управления двухуровневой системы можно принять следующие допущения:

1) КУБ функционирует в условиях определенности;

2) общая задача управления безопасностью и частные задачи управления, решаемые на нижележащем уровне, являются задачами оптимизации.

Глобальная задача оптимизации  $D_0$  отражает глобальную цель управления двухуровневой системой и сводится к следующей постановке:

найти

$$\min_{m \in M} g(\bar{m}) = G[\bar{m}, \Pi(m)]$$

$$\bar{m} = (m_1, m_2, \dots, m_n); M = M_1 \times M_2 \times \dots \times M_n.$$

Функция  $g(\bar{m})$  является глобальной целевой функцией.

При рассмотрении локальных оптимизационных задач предполагается, что управляемый процесс  $\Pi$  представлен в виде композиции подпроцессов

$\Pi_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), взаимодействующих между собой, причем управление каждым подпроцессом  $\Pi_i$  находится в ведении соответствующего управляющего элемента нижнего уровня  $C_i$ .

Взаимодействие подпроцесса  $\Pi_i$  с другими реализуется через множество связей  $u_i \in U_i$ . Пусть  $D_i$  – локальная оптимизационная задача, решаемая  $i^{blm}$  управляющем органом нижнего уровня, а локальная оптимизационная функция качества решения данной задачи выглядит следующим образом:

$$g_i(m_i, u_i) = G_i[m_i, \Pi_i(u_i, m_i)],$$

где  $M_i \times U_i$  – множество задания целевой функции.

Принципы координации являются центральным звеном при построении иерархических систем управления. Известны два способа воздействия на локальные задачи оптимизации со стороны верхнего уровня: 1) через функцию качества  $G_i$  – координация путем изменения уровня; 2) через изменение параметров множества связей  $U_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) в выделенном классе подпроцессов  $\Pi_i$  – координация путем изменения ограничений.

Первый способ предполагает задание не одной, а множества локальных функций качества, в результате чего координирующий сигнал  $s_i$  направлен на выбор соответствующей функции качества функционирования из заданного числа  $i^{ii}$  управляющей системы. В том случае, когда нет возможностей для координации путем изменения целей, используют координацию путем изменения ограничений на основе принципа развязывания взаимодействий  $u_i$  или принципа прогнозирования взаимодействий  $u_i$ .

Принцип развязывания взаимодействий предполагает, что каждый нижележащий управляющий элемент получает право при решении собственной задачи управ-

ления рассматривать связующие входы  $u_i$  как дополнительные переменные, которые он выбирает из собственных локальных критериев. Очевидно, что подлежащие решению задачи управления нижнего уровня определяются в этом случае так, как если бы нижележащие элементы и подпроцессы были полностью автономными (развязанными).

Принцип прогнозирования взаимодействий предполагает, что координирующие сигналы  $s_i$  содержат информацию о прогнозируемых значениях связей  $u_i$ , которые будут иметь место при подаче управляющих воздействий.

#### 4.2.1. Структурный синтез КУБ

В настоящее время при построении структуры комплексов управления, подобных КУБ, широко используются агрегированные комплексы унифицированных элементов. Первые системы автоматизированного управления проектировались для решения определенной задачи или ограниченного класса задач, и структура систем была жесткой, с трудом поддающейся даже небольшим изменениям. Однако со временем стало ясно, что путь индивидуального проектирования систем малоперспективен с точки зрения внедрения в производство, и поэтому в настоящее время при разработке систем широко используется принцип агрегации структуры. При этом под агрегацией структуры понимается переход от проектирования жесткой структуры к набору автономных функциональных блоков различного назначения, из которых можно компоновать системы произвольной структуры. Каждый такой блок может самостоятельно выполнять свою специальную функцию, но сконструирован таким образом, что его легко состыко-

вать с другими функциональными блоками агрегатной системы.

При автоматизации процессов управления безопасностью на ТК и СК возникает необходимость в создании местных управляющих средств в силу нецелесообразности загрузки центрального процессора выполнением тех или иных управляющих функций ограниченного характера. В ряде случаев централизация всех функций управления вообще оказывается неэффективной. Это и определяет необходимость в разработке комплекса технических средств для локальных информационно-управляющих систем по безопасности процессов подготовки РКН либо с децентрализованной структурой, либо построенных по иерархическому принципу с централизованным управляющим звеном в верхнем ярусе управления и местными средствами управления в нижнем. Эта часть КУБ включает в себя большое разнообразие средств, обеспечивающих:

- получение информации от датчиков различной природы, установленных на агрегатах и системах НТО ТК и СК;
- преобразование сигналов датчика по форме;
- ввод и коммутацию входной информации для устройств обработки и хранения информации;
- хранение и обработку информации и преобразование ее в необходимую форму;
- использование выходных данных при помощи индикаторов, различных регистраторов, исполнительных органов и т. д.

При определении структуры технического компонента КУБ необходимо выполнить: выбор задач управления, возлагаемых на технические средства; выбор алгоритмов их реализации; формирование структуры тех-

нической системы управления безопасностью и распределение выбранных задач по узлам и уровням такой структуры; определение комплекса технических средств в узлах технической системы и их взаимосвязей.

Эти этапы формирования технического компонента КУБ взаимно связаны, и задачи каждого из них решаются с учетом ресурсов, выделяемых на создание КУБ в целом. Выбранная структура считается оптимальной, если достигается максимум выбранного показателя эффективности (2.1), отражающего основные свойства системы с точки зрения выполнения поставленных задач.

На этапе структурного синтеза функции системы представляются в виде совокупности взаимосвязанных задач, которые в свою очередь могут быть разбиты на совокупность операций. По известным характеристикам операций и их взаимосвязей могут быть получены соответствующие характеристики задач.

При формализации взаимосвязей между функциями обычно учитываются порядок следования операций и их длительности (временные связи), а также объемы обмениваемой информации (объемные связи). Формализация взаимосвязей обычно производится на основе теории графов [142]. Существующие постановки задачи синтеза структур систем управления могут различаться по следующим условиям: задано или подлежит выбору множество задач; заданы или подлежат выбору взаимосвязи между задачами (временные, объемные, объемно-временные); заданы или подлежат выбору элементы системы (комплекс технических средств); учитывается или не учитывается территориальное расположение элементов; заданы или подлежат выбору связи между элементами системы; учитывается или не учитывается

возможность выполнения задачи в нескольких элементах (распараллеливание выполнения задач).

Одновременно с этим уже формализованные постановки задачи структурного синтеза могут различаться: видом показателя эффективности; типом учитываемых характеристик элементов; видом ограничений, накладываемых на учитываемые ресурсы (временные, технико-экономические и т. д.). При решении задач структурного синтеза находят применение различные модели и методы. Широкое распространение получили модели математического, особенно дискретного, программирования в силу комбинаторного характера многих задач. Постановка задач синтеза структуры системы управления сложными объектами дана в [142].

Используя результаты такой постановки, можно выполнить ее решения для технического компонента КУБ. Можно полагать, что для КУБ топология размещения центров управления безопасностью известна, функции управления перечислены в виде последовательности задач, которые необходимо распределить между центрами управления безопасностью. При построении структуры системы управления безопасностью необходимо распределить задачи ( $i = 1, 2, \dots, I$ ) между центрами управления ( $j = 1, 2, \dots, Y$ ), выбрать алгоритмические способы реализации функций ( $k = 1, 2, \dots, k_i$ ), типы технических средств в узлах системы ( $l = 1, 2, \dots, L$ ) и вариант организации канала связи между центрами. При этом следует учитывать технико-экономические характеристики технического компонента КУБ, такие как затраты на создание ( $A$ ) и эксплуатацию ( $B$ ), оперативность, которая характеризует длительность выполнения цикла управления безопасностью ( $T$ ), надежность технического компонента КУБ ( $P$ ), его масса ( $W$ ), энергопотребление ( $E$ ) и др.



Для формализации постановки задачи введем переменные:

$x_{ikjl} = 1$ , если  $i^я$  задача решается по  $k^{мy}$  варианту в центре при помощи  $l^{co}$  технического средства;

$x_{jl} = 1$ , если  $j^{ii}$  центр оборудуется  $l^m$  техническим средством;

$x_{jj'} = 1$ , если необходимо создать канал связи между центрами  $j$  и  $j'$ ;

$x_{ikjl} = x_{jl} = x_{jj'} = 0$  в противном случае.

Тот факт, что каждый вариант построения структуры должен включать в себя лишь один способ распределения задач по центрам технического компонента КУБ и один способ выполнения каждой задачи, учитывает ограничение

$$\sum_{k, j, l} x_{ijkl} = 1, i = 1, 2, \dots, I.$$

Переменные  $x_{jl} = x_{jj'}$  зависят от  $x_{ikjl}$  и используются для удобства записи аналитических выражений расчета различных характеристик вариантов структуры:

$$x_{jl} = \begin{cases} 1, & \text{если } \sum_{i, k} x_{ikjl} \geq 1; \\ 0, & \text{если } \sum_{i, k} x_{ikjl} = 0, \end{cases}$$

$$x_{jj'} = \begin{cases} 1, & \text{если } \sum_{i, k, i', k', l, l'} x_{ijkl} x_{i'k'j'l'} \geq 1; \\ 0, & \text{если } \sum_{i, k, i', k', l, l'} x_{ijkl} x_{i'k'j'l'} = 0. \end{cases}$$

Для определения характеристик вариантов структуры введем следующие обозначения:

$A_l$  – стоимость технического средства  $l$  либо затраты на разработку и изготовление перспективных средств;

$A_{jj'}$  – стоимость создания канала связи, включающая в себя стоимость технических средств приема и передачи информации между центрами  $j$  и  $j'$ ;

$A_{ikjl}$  – затраты на разработку информационного и математического обеспечения решения  $i^{\text{й}}$  задачи в  $k^{\text{м}}$  варианте в  $j^{\text{м}}$  центре при наличии  $l^{\text{ср}}$  технического средства;

$B_{ikjl}$  – эксплуатационные затраты на решение  $i^{\text{й}}$  задачи в  $k^{\text{м}}$  варианте;

$B_{ij(i+1)j'}$  – затраты на передачу информации от  $i^{\text{й}}$  задачи, решаемой в  $j^{\text{м}}$  центре, к  $(i+1)^{\text{й}}$  задаче, решаемой в  $(j')^{\text{м}}$  центре;

$t_{ikjl}$  – время решения  $i^{\text{й}}$  задачи  $k^{\text{м}}$  способом в  $j^{\text{м}}$  центре  $l^{\text{ср}}$  технического средства;

$t_{ij(i+1)j'}$  – время передачи информации от  $i^{\text{й}}$  задачи, решаемой в  $j^{\text{м}}$  центре, к  $(i+1)^{\text{й}}$  задаче, решаемой в  $(j')^{\text{м}}$  центре;

$P_{ikjl}$  – надежность решения задачи (технического средства), определяемая вероятностью безотказной работы;

$P_{ij(i+1)j'}$  – надежность передачи информации (канала связи), определяемая как  $P_{ikj}$ ;

$W_l$  – масса технического средства;

$E_l$  – энергопотребление технического средства.

Используя введенные обозначения, можно записать соотношения для определения характеристик вариантов структуры.

Капитальные затраты  $A$  включают в себя стоимость технических средств в центрах, стоимость создания каналов связи между центрами системы, затраты на разработку алгоритмов выполнения задач:

$$A = \sum_{l, j} A_l x_{lj} + \sum_{j, j'} A_{jj'} x_{jj'} + \sum_{i, k, j, l} A_{ikjl} x_{ikjl}.$$

Эксплуатационные затраты  $B$  включают в себя затраты на выполнение задач управления безопасностью и затраты на передачу информации между центрами системы:

$$B = \sum_{i, k, j, l} B_{ikjl} x_{ikjl} + \sum_{k' i, k, j, l, j', l'} B_{ij(i+1)j'} x_{ikjl} x_{(i+1)k'j'l'}.$$

Время выполнения цикла управления, характеризующее оперативность управления, вычисляется аналогично:

$$T = \sum_{i, k, j, l} t_{ikjl} x_{ikjl} + \sum_{k' i, k, j, l, j', l'} t_{ij(i+1)j'} x_{ikjl} x_{(i+1)k'j'l'}.$$

При определении надежности системы можно принять, что она невосстанавливаемая, в результате чего ее надежность характеризуется вероятностью безотказной работы элементов. Поэтому

$$\bar{P} = \sum_{i, k, j, l} \bar{P}_{ikjl} x_{ikjl} + \sum_{k' i, k, j, l, j', l'} \bar{P}_{ij(i+1)j'} x_{ikjl} x_{(i+1)k'j'l'},$$

где  $\bar{P}$ ,  $\bar{P}_{ikjl}$ ,  $\bar{P}_{ij(i+1)j'}$  — логарифмы соответствующих величин.

Массу и энергопотребление технических средств в центрах системы можно принять в следующем виде:

$$W_j = \sum_{i,k,l} W_l x_{ikjl} ;$$

$$E_j = \sum_{i,k,l} E_l x_{ikjl} , j = 1, 2, \dots, J.$$

При решении задачи синтеза структуры любая из указанных характеристик может быть выбрана в качестве показателя эффективности (в зависимости от цели и назначения системы), который оптимизируется, а другие учитываются в ограничениях. Поэтому в общем виде задача оптимизации структуры автоматизированного технического компонента КУБ выглядит следующим образом:

$$\min(\max) f(x_{ikjl}, x_{jl}, x_{jj'})$$

$$f_s(x_{ikjl}, x_{jl}, x_{jj'}) \leq D_s, s = 1, 2, \dots, S$$

$$\sum_{k,j,l} x_{ijk} = 1, i = 1, 2, \dots, I$$

$$x_{ijk} = (0;1); x_{jl} = (0;1); x_{jj'} = (0;1)$$

Такая постановка задачи показывает, что она является моделью дискретного программирования и носит комбинаторный характер. При ее решении возникают трудности принципиального характера, такие как: необходимость исключения явного перебора всех допустимых решений и сведение задачи к частичному перебору сравнительно малого числа вариантов решения соответствующей задачи и неявному перебору остальных.

### **4.3. Система поддержки принятия решений при управлении безопасностью**

Известные на сегодня системы поддержки принятия решений являются прежде всего информационными системами, под которыми понимаются автоматизированные системы, предназначенные для организации, хранения, пополнения, поддержки и представления пользователям информации в соответствии с их запросами [143, 144].

К числу информационных систем, имеющих самостоятельное значение, относятся информационно-поисковые, информационно-справочные и информационно-управляющие системы. Информационно-поисковые и информационно-справочные системы предназначены для хранения и представления пользователю информации в соответствии с некоторыми формально задаваемыми характеристиками. Для указанных систем характерны два основных этапа функционирования: сбор и хранение информации; поиск и выдача информации пользователю.

Информационно-справочные системы поддержки принятия решений, в основе которых лежат указанные этапы функционирования, являются довольно простыми и находят широкое применение на начальных стадиях разработки систем поддержки принятия решений. Они и в наше время могут оказаться достаточно эффективными при принятии несложных решений.

Достигнутые в течение последнего десятилетия результаты развития средств вычислительной техники, методов проектирования программного и информационного обеспечения различных средств автоматизации способствовали созданию новых информационных технологий, основным принципом которых является обес-

печение общения пользователя с системой автоматизации в привычной и удобной пользователю форме при решении задач различной сложности, в том числе и не имеющих количественного выражения.

Под системами поддержки принятия решений понимается человеко-машинная система, представляющая собой совокупность программных и технических средств, ориентированных на оказание помощи лицу, принимающему решение (ЛПР), за счет развитых инструментальных программных средств и математических моделей выбора решений [144].

Анализ литературы по вопросам возможного применения систем поддержки принятия решений для управления безопасностью технологического процесса на ТК и СК показывает, что до настоящего времени этот вопрос в литературе практически не освещался. Поэтому для исследования закономерностей управления безопасностью с использованием системы поддержки принятия решений необходимо определить место и функциональную значимость этих систем в существующей структуре КУБ и сформировать новую структуру.

Традиционная структура управления агрегатами и системами ТК и СК включает: объект управления, каналы и средства сбора информации (КССИ), каналы получения информации ЛПР, каналы и средства управления объектом. Данная структура выделена на рис. 4.17 жирной линией.

Применяемая система поддержки принятия решений предназначена для обработки информации о факторах опасности, поступающей от объекта, выработки рекомендаций и представления их ЛПР. Поэтому предполагаемое место системы поддержки принятия решений в структуре управления безопасностью процессов подготовки и производства пусков РКН находится между

КССИ и ЛПР. На рис. 4.17 показаны три основных компонента КУБ: КУБ<sub>1</sub> – приборный сегмент, устанавливаемый на объекте управления (агрегат или система НТО ТК и СК); КУБ<sub>2</sub> – технические средства обработки и хранения информации о безопасности объекта управления; КУБ<sub>3</sub> – система поддержки принятия решения (СППР).

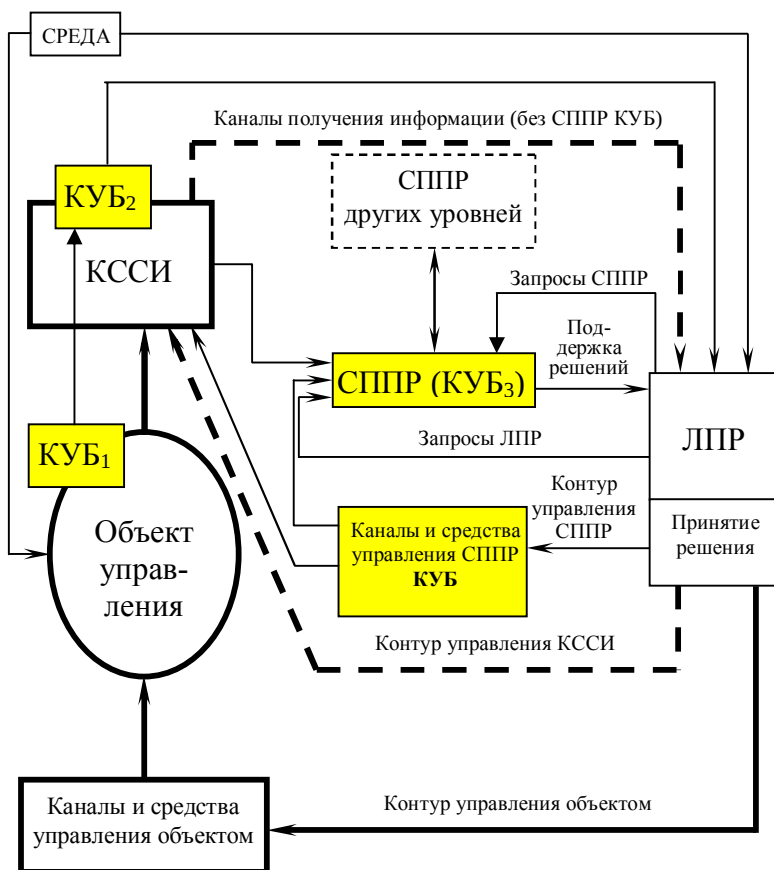


Рис. 4.17 Структура управления агрегатами НТО ТК и СК совместно с КУБ

Внедрение системы поддержки принятия решений в общий контур управления позволит повысить его оперативность и эффективность, а также обеспечит управление безопасностью за счет принятия ЛПР более обоснованных решений.

Выявление особенностей функционирования агрегатов и систем НТО ТК и СК в опасных состояниях, а также формирование и анализ структуры управления безопасностью с использованием системы поддержки принятия решений позволяют определить тип разрабатываемой системы поддержки принятия решений, ее архитектуру и необходимые характеристики.

Для практической реализации предлагаемой структуры управления безопасностью необходима разработка теоретических основ применения системы поддержки принятия решений для НТО ТК и СК, что предполагает создание концепции, методов и моделей построения системы поддержки принятия решений в указанной области, принципов и методик анализа функционирования агрегатов и систем НТО ТК и СК в опасных состояниях с целью создания алгоритмического и программного обеспечения системы поддержки принятия решений, а также соответствующих программных и технических средств.

Сложность и многообразие задач принятия решений на космодромах и в подразделениях, эксплуатирующих НТО ТК и СК, таковы, что для разработки системы поддержки принятия решений требуется формирование иерархически структурированного комплекса задач, который обеспечивал бы эффективное применение комплексов НТО ТК и СК. Одной из таких задач является анализ существующих систем поддержки принятия решений и их особенностей, их классификация и определение систем поддержки принятия решений, наи-



более подходящих для использования при принятии оператором решений по управлению безопасностью функционирующих агрегатов и систем НТО ТК и СК.

4.3.1. Классификация системы поддержки принятия решений. Представляется возможным выполнить декомпозицию существующего множества системы поддержки принятия решений (СППР) по этапу жизненного цикла объекта в зависимости от специфики решаемых на данных этапах задач (рис. 4.18).

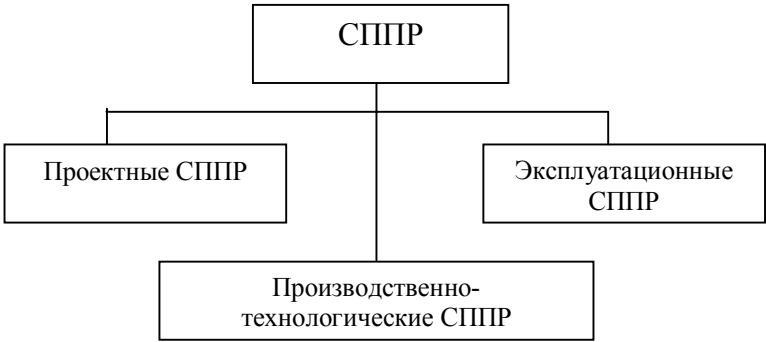


Рис. 4.18 Классификация СППР по области применения

Классификация систем поддержки принятия решений в зависимости от вида принимаемых решений различает системы управленческих и проектных решений [144] (рис. 4.19).

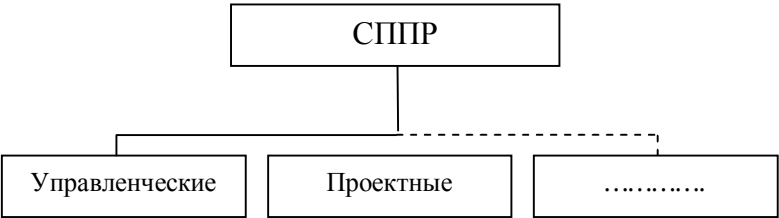


Рис. 4.19 Классификация СППР по области применения

Такая классификация является незавершенной, так как помимо управленческих и проектных решений можно выделить ряд других решений, например диагностических, мониторинговых и т.п.

Классификация эксплуатационных управленческих систем поддержки принятия решений по виду управления различает технические, при решении задач на технике, и организационно-административные, направленные на организацию деятельности эксплуатирующих организаций по эксплуатации соответствующего оборудования (рис. 4.20).

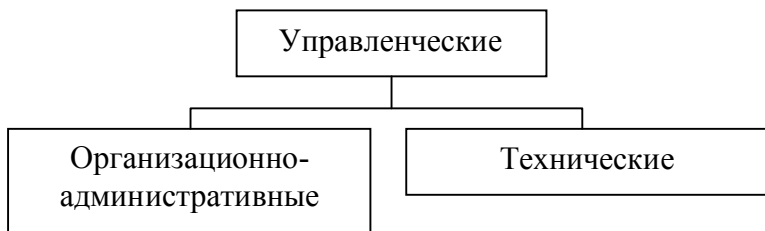


Рис. 4.20 Классификация управленческих СППР по виду управления

Классификация СППР по уровням принятия решений основана на том, что в каждом отдельном случае уровень процесса принятия решения определяется по тому, кто является субъектом, т.е. кем оно вырабатывается – отдельным лицом, группой, организацией или несколькими организациями.

На индивидуальном уровне речь идет об отдельно рассматриваемом лице, принимающем решение (ЛПР), и в первую очередь об операторе агрегата или системы. В данном случае ЛПР лично организует и проводит все этапы процесса принятия решения, решая самостоятельно проблему от начала до конца. Необходимо отме-

тять, что он всегда действует среди некоторого окружения, включающего помощников, специалистов и экспертов. Хотя он и принимает самостоятельно окончательное решение, которое можно считать индивидуальным, но все эти лица помогают ему в этом, оказывают поддержку. Причем эти лица, каждый на своем рабочем месте, также принимают свои индивидуальные решения по той же схеме. По мере повышения уровня процесса принятия решения доля индивидуально вырабатываемых серьезных решений убывает.

На групповом уровне процесс принятия решения осуществляется группой лиц, взаимодействующих друг с другом по организационно обусловленным или формализованным процедурам или по не всегда формально установленным правилам и процедурам рациональной коллективной деятельности по решению проблем. Это процедуры изучения проблемы членами группы, высказывания мнений, внесения и анализа предложений, выражения предпочтений, защиты и критики предложений, получения дополнительной информации. Для решения тех или иных проблем руководитель использует уже имеющиеся в его распоряжении группы или специально создает новые.

На одних этапах процесса принятия решений может оказаться эффективнее индивидуальная деятельность, а на других – групповая.

На организационном уровне решение проблемы усложняется еще больше из-за числа участвующих в этом процессе лиц и групп, разносторонности и противоречивости задач и интересов, сложности структуры современных организаций, более высокой степени риска и т. д.

На межорганизационном уровне принятие решений требует целенаправленного и скоординированного

взаимодействия между различными организациями в условиях совместного целеполагания, урегулирования конфликтных и спорных вопросов, рационального распределения дефицитных ресурсов, учета политических, экономических и социальных факторов и последствий принимаемых решений, утверждаемых, как правило, на более высоких уровнях.

В соответствии с рассмотренными уровнями процесса принятия решений можно выделить следующие типы системы поддержки принятия решений (рис. 4.21).

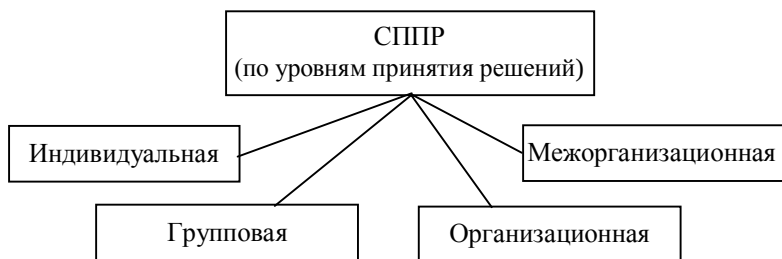


Рис. 4.21 Классификация СППР по уровням принятия решений

Индивидуальная (персональная) система поддержки принятия решений предназначена для отдельного лица, принимающего решение.

Задача системы в данном случае – обеспечить на всех этапах процесса принятия решения персональную поддержку личного труда ЛПР, а также оказать помощь этому лицу в случае его участия в выработке групповых, организационных и межорганизационных решений. Поскольку она как бы дополняет индивидуальные способности ЛПР, то ее возможности напрямую зависят от его личных качеств, знаний, навыков, опыта, установок и ценностных ориентаций. Все эти факторы по-

разному сказываются на разных этапах процесса принятия решений.

Поскольку система ориентирована, как уже отмечалось, на обслуживание вполне конкретного лица, на саму ее структуру и порядок работы непосредственное влияние оказывает целый ряд психологических факторов, мешающих целенаправленной выработке решений:

- тенденциозность подбора информации при принятии решения;
- необоснованный оптимизм;
- эффект сопротивления;
- эффект регрессивного мышления и др.

Групповая система поддержки принятия решений ориентирована на обслуживание группы лиц, взаимодействующих между собой при решении какой-либо проблемы. Роль групповой поддержки решений значительна на всех этапах процесса выработки и принятия решений и не ограничивается собственно актом принятия решения.

Групповые системы поддержки принятия решений определенным образом дисциплинируют и упорядочивают деятельность по выработке и принятию решений, вносят в нее определенность, укладывают неформальные по своему содержанию процессы в строгие технологические рамки, обеспечивают более рациональное распределение труда при принятии решений, позволяют наиболее целесообразно сочетать в ходе принятия решений неформальные, личностные, качественные суждения и оценки с точными количественными данными.

Наиболее сложными системами поддержки принятия решений являются организационные и межорганизационные системы поддержки принятия решений. Сложность системы поддержки принятия решений на-

прямую зависит от сложности проблем, с которыми ей приходится иметь дело. Существует целый ряд факторов, определяющих сложность проблем организационного и тем более межорганизационного уровней и процессов поддержки их решения.

Прежде всего, это комплексный, междисциплинарный характер таких проблем, для описания, анализа и решения которых нужны знания и опыт в самых разнообразных областях. Решение проблем такого рода невозможно обеспечить силами какой-то одной организации (расчетом ТК или СК); для этого часто создают новую, иногда достаточно разветвленную организационную структуру, включающую десятки организаций (службы эксплуатации технологического оборудования, отопления, водоснабжения, вентиляции, транспортировки, обслуживания, ремонта и т.д.), каждая из которых обладает своим опытом по решению рассматриваемой проблемы.

Еще одним важным обстоятельством является то, что при решении подобных проблем возникают или сознательно ставятся целый ряд целей решения проблемы. Наличие нескольких целей решения проблемы влияет и на сам подход к решению. Здесь необходим многовариантный анализ проблемы.

Решения организационного и межорганизационного характера часто влекут за собой достаточно отдаленные последствия и возможность или необходимость принятия новых решений, часть из которых даже трудно предвидеть на момент принятия первоначального решения. Необходимо отметить, что чем отдаленнее горизонт принимаемого решения, тем труднее предвидеть и оценить его последствия и тем тяжелее груз ответственности за его принятие.

Как уже отмечалось, в принятие межорганизационных решений оказываются вовлеченными большое количество различных организаций. Поэтому одна из задач поддержки межорганизационных решений заключается в тщательном и всестороннем учете интересов всех вовлеченных сторон.

Организационные и межорганизационные системы поддержки принятия решений могут включать в себя индивидуальные и групповые системы, образуя сложные структуры, например иерархического типа, в верхней части которых снова находится индивидуальная система поддержки принятия решений.

Классификация систем поддержки принятия решений по важности принимаемых решений основана на том, что в процессе управления агрегатами и системами НТО ТК и СК операторы сталкиваются с различными задачами, в зависимости от важности которых, а также от времени, необходимого для их решения, определяется порядок их решения (рис 4.22). Такие задачи можно разделить на оперативные, тактические и стратегические. Таким образом, в зависимости от важности задачи, т.е. зачастую от важности сложившейся ситуации, оператор должен выделить те задачи, которые необходимо решить в первую очередь.



Рис. 4.22 Классификация СППР по важности принимаемых решений

Оперативные системы обеспечивают решение проблем, которые необходимо решать почти сразу по мере их появления. При таком подходе эффект от применения системы поддержки принятия решений виден сразу.

Для оперативных систем поддержки принятия решений характерны:

- невысокая сложность проблемы;
- структурированность, достаточно хорошая изученность решаемых задач;
- предназначенность в основном для ЛПР низшего звена.

Под структурируемостью задачи имеется в виду возможность представления ее на алгоритмическом языке, простота трансляции на языки программирования.

Стратегические системы подразумевают принятие решений уникального типа, требующих солидной подготовки, всестороннего обсуждения. Они ориентированы на то, что нужно делать в будущем, а не на то, как это делать. Анализ стратегических проблем занимает много времени; средства их решения приходится всякий раз разрабатывать заново, что требует проведения работ научно-исследовательского характера. Для поддержки стратегических решений требуется долго и целеустремленно накапливать большие базы данных.

Для систем поддержки принятия решений этого типа характерны:

- повышенная сложность проблемы (большое число переменных, ограничений, критериев);
- неструктурированность решаемых задач, уникальность проблем;
- предназначенность для ЛПР высших уровней.



Тактические системы занимают промежуточное положение между оперативными и стратегическими.

Для них характерны:

- умеренная сложность проблемы;
- умеренная степень структурированности решаемых задач;
- предназначенность для ЛПР как низших, так и более высоких уровней.

Классификация систем поддержки принятия решений по форме поддержки решений выделяет различные формы поддержки управленческих решений: информационную, вычислительную, информационно-вычислительную, интеллектуальную (когнитивную) [146].

В зависимости от применяемой в СППР формы поддержки различают следующие типы систем (рис. 4.23).

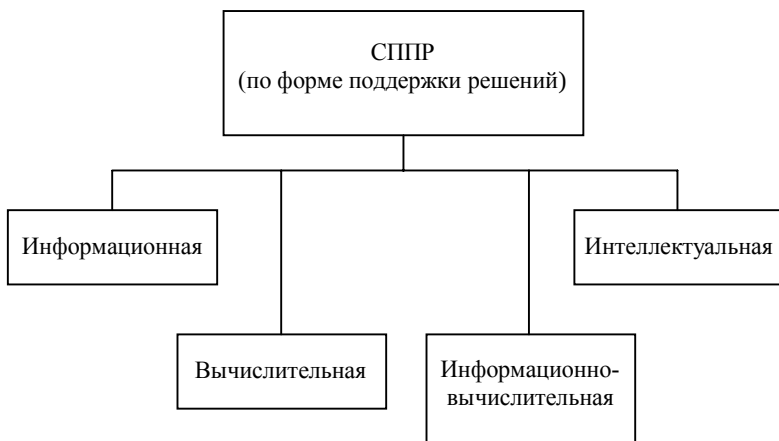


Рис. 4.23 Классификация СППР по форме поддержки решений

Задачей информационных систем поддержки принятия решений на современном этапе является обеспечение ЛПР (как по его запросу, так и в режиме регулярного информирования) своевременной, безошибочной и нужной информацией на всех этапах процесса принятия решения. Выполнение этой задачи связано со сбором, накоплением, хранением, обработкой больших объемов данных о конкретных предметных областях и выдачей как «сырой» информации, так и переработанной – в виде сводок, справок и т.д.

Таким образом, для информационных систем поддержки принятия решений характерно определение оптимального уровня количества и качества информации, необходимой для принятия решения.

Задачей вычислительных систем поддержки принятия решений является оказание помощи ЛПР в решении сложных проблем, требующих обработки количественной информации. Как правило, эти системы предназначены для конкретных узких предметных областей. При работе таких систем к ЛПР попадают уже результаты расчетов, которым он дает окончательную оценку с точки зрения их использования.

Для вычислительных систем поддержки принятия решений характерна разработка математических моделей предметной области с позиции системного анализа и формирование базы моделей.

Информационно-вычислительные системы поддержки принятия решений возникли на основе интеграции средств информационной поддержки, обеспечивающих ЛПР информацией на всех этапах принятия решений, и средств вычислительной поддержки, подготавливающих в режиме диалога рекомендации ЛПР по анализу ситуаций и выработке решений.

В основе информационно-вычислительной системы поддержки принятия решений лежат методы и средства современных информационных технологий, технологии моделирования и программирования.

Интеллектуальные системы поддержки принятия решений являются сравнительно молодым типом систем поддержки принятия решений, основывающимся на переработке знаний по проблемной области. Такие системы поддержки принятия решений разрабатываются и развиваются на основе идей из области искусственного интеллекта.

Для интеллектуальных систем поддержки принятия решений характерно наличие трех основных компонентов [143 ÷ 146]:

- языковой процессор;
- процессор проблем;
- подсистема (база) знаний.

Таким образом, интегрируя полученные ранее предпочтения по функциональным и структурно-архитектурным аспектам синтеза КУБ, приходим к выводу, что система поддержки принятия решений должна быть построена как для проектных, так и для эксплуатационных задач управления безопасностью и включать в свой состав как технический, так и организационно-административный сегменты. При этом система поддержки принятия решений КУБ должна быть нацелена на оперативное принятие решений по быстроразвивающимся факторам опасности и построена как информационно-вычислительная система.

Представленные в настоящей главе результаты исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. Процесс управления безопасностью НТО ТК и СК имеет три основных компонента: обслуживающий персонал; технические средства наземной инфраструктуры КРК и информацию о состоянии средств наземной инфраструктуры КРК, которая содержит организационно-кадровый и технический аспекты.

2. Организационно-кадровая структура управления КУБ основывается на выявлении устойчивых взаимосвязей и особенностей структурного построения подразделений КУБ, характеризующих возможности подготовки, принятия и реализации решений по функциям управления безопасностью. Целевое единство процессов управления эксплуатацией и обеспечением безопасности НТО ТК и СК позволяет сделать вывод о применимости для КУБ матричной организационно-кадровой структуры управления безопасностью.

3. Решение задачи о наполнении организационно-кадровой структуры управления безопасностью КУБ специалистами с определением их численности и уровня квалификации показывает, что формирование расчета для работы в КУБ не требует существенного увеличения количества обслуживающего персонала и принципиально нового уровня подготовки специалистов. Расчет КУБ должен формироваться на основе взаимозаменяемости обслуживающего персонала КРК в целом, а его численность определяется особенностями функционирования каждого конкретного комплекса. Ее можно определить по методике, приведенной в п. 4.1. Вместе с тем в структуре управления безопасностью

ТК и СК необходимо специальное подразделение – информационно-вычислительный центр (ИВЦ), ответственный за упорядочение, регламентацию и непосредственное выполнение информационных процессов на ТК и СК.

4. Для КУБ система поддержки принятия решений должна быть построена как для проектных, так и для эксплуатационных задач управления безопасностью и включать в свой состав как технический, так и организационно-административный сегменты. При этом система поддержки принятия решений КУБ должна быть нацелена на оперативное принятие решений по быстро-развивающимся факторам опасности и построена как информационно-вычислительная система.

## **V. ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ КОМПЛЕКСА УПРАВЛЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ПРОЦЕССОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ И СТАРТОВЫХ КОМПЛЕКСОВ**

Основные результаты, представленные в настоящей монографии, реализовывались для решения задач, поставленных в следующих нормативных правовых и руководящих документах:

- Федеральная космическая программа России на 2006-2015 годы;
- поручения Правительства РФ от 27.12.2000 г. № ИК-П7-33788 и от 14.03.2002 г. № МК-П4-03689 о создании «Единой системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций космического характера»;
- Федеральный закон от 20 августа 1993 года № 5663 «О космической деятельности»;
- Федеральный закон от 21 декабря 1994 года № 68-ФЗ «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера»;
- Концепция создания единой системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций космического характера от 20.02.2001;
- Федеральный закон «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера»;
- Постановление Правительства Российской Федерации от 5 ноября 1995 г. № 1113 «О единой государственной системе предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций»;

- другие нормативные правовые акты и международные соглашения в области космической деятельности и защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций.

Разработанные рекомендации, которые представлены в монографии, прошли апробацию при выполнении проектно-конструкторских и эксплуатационных мероприятий на объектах наземного оборудования КРК таких комплексов, как «Ангара», «Морской старт», «Зенит-М» (по программе «Наземный старт» – продолжению программы "Sea launch" на территории космодрома Байконур), а также по проекту КСЛВ для Республики Корея.

Положения, представленные в монографии, позволили сформировать ряд предложений по перспективам развития предприятия (КБТМ) по таким направлениям обеспечения безопасности процессов функционирования НТО ТК и СК, как:

- развитие программных реализаций методик обработки данных измерения технического состояния элементов НТО ТК и СК, специализированных для отдельных составных частей систем и агрегатов, условий их эксплуатации и особенностей функционирования;
- разработка базы данных, адаптированной к конкретному НТО ТК и СК;
- проведение анализа технического состояния НТО ТК и СК при контроле над оптимальным формированием и пополнением ЗИП, применительно к СК и ТК, которые эксплуатируются КБТМ и за которыми оно осуществляет авторский надзор;

- создание высокоэффективных рентабельных технологий комплексной оценки технического состояния сложных технических комплексов и технологического оборудования в различных отраслях народного хозяйства на основе созданной экспериментальной базы и разработанных методов исследований;
- изменение организационно-штатной структуры предприятия, включающее создание по всем основным проектным и эксплуатационным направлениям системы циклического рассмотрения принимаемых решений в подразделениях теоретического, расчетного и экспериментального исследования;
- обоснование структуры и состава ЗИП для эксплуатируемого в настоящее время РКК «Морской старт».

## **5.1. Внедрение методологических положений по формированию КУБ**

5.1.1. Предложенный в первом разделе методологический подход к формированию КУБ, а также результаты работ [147 ÷ 150] имеют стратегию минимального ресурсопотребления активных средств для обеспечения безопасности технологических процессов, осуществляемых НТО ТК и СК. Эта стратегия реализуется на предприятии по таким направлениям, как:

– оптимизация штатного расписания управления [151], основных и обеспечивающих подразделений предприятия, включающая введение в штатное расписание предприятия новых подразделений (например, ла-



боратории газодинамических исследований и оценки технического состояния РКК);

– автоматизация проектно-конструкторских работ предприятия, основанная на создании и внедрении:

- конструкторско-моделирующего комплекса (КМК), обеспечивающего комплексную увязку программно-аппаратных средств, необходимых для выполнения проектно-конструкторских задач, и измерительных комплексов, позволяющих кроме решения проектно-конструкторских задач и организации делопроизводства обеспечивать ввод и обработку данных для оценки и прогнозирования технического состояния НТО ТК и СК, регистрировать и анализировать эксплуатационные нагрузки, сопровождающие процессы функционирования НТО ТК и СК, а также благодаря использованию специального прикладного программного обеспечения, позволяющего на основе измеряемых параметров давать оценку технического состояния НТО ТК и СК, обеспечивать корректировку конструкторской документации в части контроля над формированием и восполнением ЗИП;
- математических моделирующих комплексов для проведения исследований процессов функционирования агрегатов и систем НТО ТК и СК [152, 153];
- экспериментальных комплексов и моделей для исследования процессов функционирования агрегатов и систем НТО ТК и СК, вклю-

чая разработку конструкторской документации для них;

- системы автоматизированного формирования исходных данных (САФИД) [154] для проектирования комплексов нового поколения, предназначенной для автоматизации информационного взаимодействия персонала предприятий кооперации разработчиков космического комплекса при подготовке и совместном использовании исходных данных на создание комплекса и его составных частей путем предоставления авторизованного доступа к ним, а также автоматизации контроля за изменениями, вносимыми в исходные данные в процессе его создания и эксплуатации;
- локальной вычислительной сети КБТМ;
- программного обеспечения для хранения и корректировки конструкторской документации;
- программного обеспечения безбумажного документооборота предприятия;

– организация безопасной эксплуатации агрегатов и систем НТО ТК и СК и выполнения авторского надзора [155], основанная на разработке и внедрении:

- автоматизированной системы координации и управления работ СК и ТК (АСКУР);
- измерительного комплекса для оценки и прогнозирования технического состояния НТО ТК и СК;

- измерительного комплекса для регистрации и анализа эксплуатационных нагрузок, действующих на агрегаты и системы НТО ТК и СК;
  - программно-аппаратного обеспечения процессов контроля формирования и восполнения ЗИП на агрегаты и системы НТО ТК и СК, а также корректировки конструкторской документации на НТО ТК и СК в части оптимизации ЗИП КРК;
  - комплекса средств неразрушающего контроля, обеспечивающего проведение мониторинга технического состояния агрегатов и систем НТО ТК и СК;
- сокращение финансовых ресурсов [156, 157], в том числе по следующим основным направлениям деятельности предприятия:
- создание КМК позволяет КБТМ обосновывать структуру и состав ЗИП, в том числе и для эксплуатируемого силами КБТМ в настоящее время РКК «Морской старт». В результате дополнительная прибыль КБТМ по проекту «Морской старт» предварительно составит около 22 млн. руб.;
  - ведущиеся в настоящее время аналогичные работы с использованием КМК в ходе выполнения проекта «Наземный старт» должны обеспечить дополнительную прибыль КБТМ около 17,5 млн. руб.;
  - передовые технологии, используемые в КМК, будут реализованы при выполнении проектов государственных заказчиков по Федеральной

космической программе, а также в интересах Минобороны России. Ожидаемая дополнительная прибыль КБТМ при реализации проектов по заказам указанных ведомств и при сохранении уровня цен на товарную продукцию в пределах, установленных в заключенных на сегодняшний день КБТМ договорах и контрактах, составит 5,2 млн. руб.;

- организация серийного выпуска и модификация созданных в процессе выполнения проекта КМК и измерительных комплексов, сервисное обслуживание реализованных комплексов, а также подготовка и переподготовка эксплуатирующего персонала потребителей позволят КБТМ получать от таких работ годовую прибыль от 5,9 до 17,8 млн. руб.;
- разработка рабочей конструкторской документации для НТО ТК и СК. Так, например, для комплекса наземного оборудования КРК «Ангара», являющегося ближайшим аналогом КРК К11К77 (КРК «Зенит»), выполненные оценки показывают, что без учета затрат на сопровождение изготовления и корректировку конструкторской документации суммарная стоимость разработки рабочей конструкторской документации на наземное оборудование УСК, ТК КРК «Ангара» и КТО при прочих равных условиях будет в 1,25 раза ниже;
- оптимизация параметров и конструкции пусковых устройств для РКН, полученная на основе исследования газодинамических процессов [158, 159], позволяет улучшить общие показатели, характеризующие проведение раз-

работок и эксплуатацию НТО СК, и обеспечить: сокращение номенклатуры и количества ЗИП для НТО СК на 50%; сокращение в 2 раза затрат на проведение исследований газодинамических процессов; сокращение объема ремонтно-восстановительных работ в 2 раза; снижение на 50 % затрат на проведение исследований газодинамических процессов; сокращение сроков выполнения расчетно-конструкторских работ на 30 %; повышение уровня безопасности пуска и безударного выхода РКН из устья пускового устройства при повышенных ветровых нагрузках на 20 %; увеличение в 2 раза ресурса и повышение срока службы конструкции пускового устройства; снижение количества обслуживающего персонала на 25 %.

## **5.2. Принцип равной безопасности наземного технологического оборудования технических и стартовых комплексов и его реализация**

Реализация принципа равной безопасности технологических операций (раздел 1), приводит к необходимости более глубокого исследования процессов пуска РКН.

Известные сегодня способы пуска РКН во многом зависят от внешних ограничений и проектных решений по технологии подготовки и пуска, а также от конструктивно-компоновочных показателей, определяющих режимные параметры. В первую очередь это связано с уникальностью процесса пуска, физические проявления которого до сих пор изучаются. Количество задач, ко-

торые традиционно должны быть решены пусковым оборудованием в условиях воздействия на него сложных и малоизученных физических процессов пуска, велико, а их значимость трудно переоценить для КРК. Масштаб и сложные комбинации действующих пусковых нагрузок делают пусковое оборудование непохожим на другие объекты НТО СК, которые в большей степени схожи с общепромышленными системами.

К основным нагрузкам, действующим на пусковое оборудование, относятся:

- весовая нагрузка, распределенная между его опорами (большое количество опор делает опорный контур статически неопределимым, а при необходимости перемещения РКН на опорах эта задача еще усложняется);

- ветровая нагрузка, действующая на пусковое оборудование в основном через корпус РКН, как и весовая нагрузка, воспринимаемая опорными устройствами, в общем случае является нестационарной;

- пусковые нагрузки проявляются в ударно-волновом, статическом, вибрационном и акустическом воздействии сил давления, а также в тепловом воздействии лучистых и конвективных тепловых потоков. При этом могут наблюдаться тепловые удары, тепловые волны, плавление и абляция конструкционных материалов пускового оборудования. Картину процессов функционирования пускового оборудования дополняет наличие таких опасных физических явлений, как:

- пролив КРТ и заполнение газоходов пускового устройства их парами;

- распространение в газоходах ударных волн от двигательных установок РКН;

- образование и распространение в газоходах ударных волн, обусловленных внезапным поступлением в них продуктов сгорания;

- взрывное доокисление продуктов сгорания и паров КРТ в газоходах;

- образование и распространение в газоходах волн разрежения при аварийном выключении двигателей РКН;

- силовое и тепловое воздействие на пусковое оборудование потока продуктов сгорания и эжектируемого в устье газохода турбулентного потока воздуха;

- акустические нагрузки высокой интенсивности, вызванные работой двигателей РКН;

- снос РКН под действием ветра при ее движении по начальному участку траектории;

- воздействие воды систем охлаждения и защиты (в виде струй или диспергированных капель);

- образование и распространение в атмосфере облака продуктов сгорания;

- накопление в газоходах использованной при его охлаждении воды.

Кроме того, на пусковое оборудование распространяются все (или почти все) требования, предъявляемые к СК в целом. В отличие от РКН, пусковое оборудование является многоразовым, незначительный ресурс которого (25–50 циклов) определяет ресурс комплекса. Поэтому для СК пусковое оборудование является наиболее обособленным видом НТО, но в то же время определяющим облик большей части всего остального оборудования. От организации пуска как одного из

определяющих технологических процессов зависит многообразие вариантов для предшествующих пуску технологических операций.

Основной задачей КУБ для пускового оборудования является сохранность газодинамического тракта от действия продуктов сгорания двигательной установки РКН и систем пускового устройства, подверженных пусковым нагрузкам. Отраженная от наземного комплекса струя продуктов сгорания способна разрушить не только НТО и строительные сооружения СК, но и саму ракету. Однако кроме этой задачи, в пусковом оборудовании есть и другие, часть которых связана с особенностью подготовки РКН, а часть – с характеристиками НТО СК, в том числе и свойствами пускового оборудования. Выбор газодинамической схемы пуска во многом определяет общий уровень безопасности всего СК, а также эффективность отвода продуктов сгорания от РКН.

Для пускового оборудования процессы отвода продуктов сгорания двигательной установки РКН при ее пуске характеризуются поворотом сверхзвуковой струи продуктов сгорания и отводом тепловых потоков в конструкцию газодинамического тракта. Организация этих процессов может быть оценена через показатели их потенциальной эффективности [41, 160]. В условиях режимных параметров современных РКН повышение стойкости конструкционных материалов или проведение большого объема послепусковых ремонтно-восстановительных работ оказывается чрезвычайно дорогим (ресурсоемким), а потому недостаточно эффективным. В связи с этим в состав пускового оборудования неизбежно должны войти специальные средства обеспечения безопасности.



Реализация такой технологии выполнена в виде систем охлаждения на КРК «Зенит» и РКК «Морской старт».

С целью повышения уровня безопасности процесса пуска РКН «Ангара», для ПУ, проектируемого КБТМ, выполнены:

- расчеты газодинамических процессов пуска с использованием теоретических зависимостей, разработанных на основе известных фундаментальных исследований в области газодинамики течения жидкости и газа, а также с учетом имеющихся статистических данных натурных измерений процессов газодинамики пуска РКН;

- разработка программ проведения газодинамических испытаний;

- разработка конструкторской документации на модели РКН и пускового устройства, а также изготовление моделей РКН и пускового устройства в масштабах 1:5, 1:15 и 1:30, позволяющих провести вариации параметров и способов подачи жидкости в струю продуктов сгорания двигательной установки РКН;

- исследования ударно-волновых, тепловых, квазистационарных и акустических газодинамических нагрузок, в ходе которых экспериментально определено влияние параметров и способов подачи жидкости для «утилизации» энергии струи продуктов сгорания, а также возникающих при этом воздействий механических колебаний, порождаемых струей продуктов сгорания, на РКН и пусковые установки;

- разработка методических материалов для определения нагрузок на РКН и пусковое устройство, а также проекта ТЗ на математический моделирующий комплекс для проведения исследований газодинамиче-

ских процессов на основе сравнительного анализа расчетно-теоретических и экспериментальных исследований;

– разработка рекомендаций по эффективной «утилизации» энергии струи продуктов сгорания при снижении воздействия на РКН и пусковое устройство механических колебаний, порождаемых струей продуктов сгорания и взаимодействием последних с элементами пускового устройства, а также по уменьшению размеров пускового устройства и, как следствие, сокращению площади, занимаемой СК.

Проведенные исследования имели целью найти новые схемы пусковых установок и стартовых сооружений, обеспечивающих необходимый уровень безопасности пуска. Такие схемы должны обеспечить низкий уровень газодинамических нагрузок, действующих на РКН, при ограничениях на габариты пускового устройства и его газодинамического тракта.

Экспериментальные и теоретические исследования проводились в направлении поиска нового способа организации взаимодействия струи продуктов сгорания с элементами пусковой установки. При этом исследовались газодинамические, теплофизические, акустические явления, а также механические колебания конструкций пускового оборудования.

Известно, что основным источником мощных пусковых нагрузок является сверхзвуковая часть струи продуктов сгорания. Поэтому основная задача исследования сводилась к поиску варианта торможения сверхзвуковой части струи продуктов сгорания до уровня дозвуковых скоростей. Этот процесс основан на взаимодействии газовой струи продуктов сгорания с организованным специальным образом потоком охлаждающей

жидкости системы охлаждения. Подача охлаждающей жидкости в струю продуктов сгорания организована через полые насадки на уровне первой бочки сверхзвуковой струи. Подача воды через насадку в подракетную область начинается до запуска двигательной установки РКН. Насадка имеет прямоугольное сечение и наклонена в сторону истечения газа. Для каждого потока газа в составной струе продуктов сгорания использованы различные насадки, имеющие свои расходные характеристики потоков воды. Важным условием работы такой системы подачи воды является равномерность расхода воды по каждой щели насадки водовода. Для обеспечения наилучшего смешения водного и газового потоков важным параметром является соотношение расстояний между насадкой и хвостовой частью РКН, с одной стороны, и насадкой и облицовкой газохода пусковой установки – с другой.

Установлено, что для разрушения сверхзвуковой части струи продуктов сгорания, начиная с первой бочки, следует обеспечить направление движения жидкости преимущественно перпендикулярно к потоку газовой струи.

Для организации такого течения воды возможно использование цилиндрического распределителя-дозатора, устанавливаемого на выходе насадки вдоль течения струи продуктов сгорания. В нем могут располагаться вращающиеся лопасти, обеспечивающие горизонтальное течение воды через боковые поверхности дозатора. При такой организации подачи воды достигается высокая дальнобойность аэрозольного парогазового облака, распространяющегося за пределы поперечных габаритов струи продуктов сгорания. При этом расход охлаждающей воды становится соизмерим с расходом продуктов сгорания двигательной установки. Ис-

пользование такой насадки для подачи воды усиливается эффектом рассеечения струи продуктов сгорания самой конструкцией насадки. Верхняя грань такой насадки имеет ступенчатый профиль с щелью на каждой ступеньке. Такая конструкция насадки обеспечивает охлаждение всех граней самой насадки, предотвращая их сгорание в высокотемпературной струе продуктов сгорания.

Для снижения нагрузок, действующих на РКН во время ее подъема с опор пускового устройства, исследовался способ подачи потоков жидкости вдоль струи продуктов сгорания. При такой подаче воды стартовое сооружение и струя продуктов сгорания экранированы парогазовым облаком. Исследовался также способ подачи воды в направлении, противоположном направлению течения струи продуктов сгорания. Организация такой подачи воды предполагает создание кольцевого коллектора, подключенного к трубопроводам подачи воды.

Подача воды в такой коллектор может осуществляться методом вытеснения. На верхней и нижней (в ином исполнении – на боковой у верхней или нижней) поверхностях коллектора по окружности могут быть расположены поочередно направленные в разные стороны косые отверстия, обращенные соответственно вверх (на верхней поверхности) и вниз (на нижней) (или в ином исполнении – наоборот, для защиты от самого коллектора). Оси соседних отверстий могут пересекаться. При этом оси всех отверстий могут принадлежать замкнутой поверхности вращения.

В результате выполненных исследований получены следующие рекомендации:

- на пути распространения струи продуктов сгорания не должны быть расположены элементы, которые являются источником дополнительных нагрузок как на конструкцию пусковой установки, так и на корпус РКН;

- все поверхности конструктивных элементов пусковой установки должны плавно переходить друг в друга;

- недопустимо наличие каких-либо пустот в конструкциях пускового устройства, так как они могут привести к увеличению акустических нагрузок, обусловленному резонансными эффектами;

- применяемые в пусковом оборудовании конструкционные материалы должны иметь одинаковые коэффициенты температурного расширения для предотвращения образования термонапряжений.

Для различных покрытий могут использоваться различные конструкционные материалы, традиционно применяемые в ракетно-космической технике. Также возможно использование и различных керамических и металлокерамических материалов, например, на основе ванадия, вольфрама, германия, железа, кобальта, молибдена, никеля, ниобия, палладия, тантала, титана, хрома и циркония с включением нитридов, сульфидов и оксидов, таких как  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Ca}_2\text{O}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{PbO}$ ,  $\text{BaO}$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{As}_2\text{O}_3$ ,  $\text{La}_2\text{O}_3$ , а также сплавов перечисленных металлов. Такие покрытия могут иметь форму плит. Например, могут использоваться бетонные плиты (скорость звука порядка 5000 м/с) и плиты, материал которых представляет собой композицию бетона и ситаллов (скорость звука порядка 4000 м/с).

В процессе исследований установлено, что большее значение для качества организации газоотвода имеет микро- и макрошероховатость рабочих поверхностей

различных скатов, которая влияет и на возбуждение определенных колебаний.

Методика расчета распространения различных видов колебаний при условии их зарождения в различных сильно отстоящих друг от друга местах конструкции пусковой установки при сложном профиле рабочих поверхностей довольно трудна и требует специального исследования.

Однако очевидна целесообразность заполнения различных резервуаров легкоплавкими материалами, отличающимися температурой плавления и другими физическими параметрами, в том числе скоростью распространения звука в них. Так, например, резервуары могут быть заполнены свинцом, оловом и сплавом Вуда. Для вырождения спектра собственных колебаний резервуары следует выполнять как минимум двух видов, при том что объем резервуаров одного из видов должен превосходить объем таковых другого более чем на 20%.

Для эффективного изолирования основных струй продуктов сгорания в пусковом устройстве целесообразно использовать многоскатный лоток, как минимум одно разделительное ребро которого с целью исключения биений и резонансных явления располагается с отклонением от проходящей между периферийными группами сопел плоскости симметрии двигательной установки. При этом можно использовать лоток, в котором предварительно выполнено как минимум одно отверстие или один желоб, предназначенные для пропускания или отведения струи продуктов сгорания одного из блоков или сопел двигательной установки, при том что такое отверстие или желоб располагают под соответствующим блоком или соплом.

Для заданной изоляции основных потоков продуктов сгорания двигательной установки необходимо опре-

делить конфигурацию скатов лотка или рабочей поверхности газоотвода, форма которых соответствует усредненной поверхности. Для этого может быть применен следующий способ определения конфигурации рабочих поверхностей элементов конструкции пусковой установки для РКН, согласованных с конфигурацией поверхности заданного уровня газодинамических (в том числе, квазистационарных) и/или температурных, и/или ударно-волновых параметров и взаимодействующих с такими поверхностями струй продуктов сгорания при запуске двигательной установки или во время ее работы до отхода РКН от пусковой установки либо в момент старта РКН. Такой способ основан на использовании моделей РКН и пусковой установки. При этом деталь, конфигурацию поверхности которой требуется определить, изготавливают из материала, разрушаемого и/или неупруго деформируемого, и/или оплавляемого воздействием на него тех участков струи продуктов сгорания, как минимум один из упомянутых параметров которых превышает заданный уровень.

Так, например, из такого материала изготавливают модель стартового сооружения. При подъеме над ней модели РКН с работающей моделью двигательной установки вырабатывают материал модели стартового сооружения в части, обусловленной конфигурацией области пространства, в пределах границ которой один или несколько параметров струи продуктов сгорания превосходят некоторый заданный уровень, определяемый стойкостью материала модели стартового сооружения.

Следует отметить, что толщина такой детали в общем случае должна быть не менее 5% от диаметра среза сопла двигательной установки (не менее 0,05 калибра). Такая деталь может изготавливаться из пористо-

го материала (например, из пористого бетона), причем размер пор такого материала может уменьшаться от рабочей поверхности вглубь детали. Далее, подбирая размер пор, добиваются заданной стойкости материала. Также такая деталь может быть изготовлена из композитного материала, например из тугоплавкого материала с вкраплениями легкоплавкого материала. Стойкость материала в этом случае задают, подбирая число вкраплений и их размер. При этом вкрапления могут преимущественно располагаться вытянутыми в одном направлении. Такого эффекта можно добиваться добавлением в основной материал детали материала вкраплений до их перехода в твердую фазу при движении с ускорением.

Такую деталь с вытянутыми вкраплениями целесообразно располагать в пусковую установку таким образом, чтобы вкрапления оказались ориентированы вдоль или поперек течения струи продуктов сгорания. Для реализации такого способа возможно использование деталей, в толще которых имеется большое количества пустот, окруженных тонкими стенками. Такой материал наиболее удобен при работе с маломасштабными моделями. Возможно также использование деталей, изготовленных из многослойного материала. Такой тип материала наиболее технологичен.

При этом различные слои такого материала могут быть одинаковыми по стойкости к воздействию струи продуктов сгорания, а могут отличаться: стойкость каждого последующего от наружной поверхности слоя может возрастать.

В ходе газодинамических исследований получены результаты, описывающие взаимодействие ПУ и РКН, и даны рекомендации по оптимизации параметров и конструкций пусковой установки для РКН [108]. При про-



ведении исследований характеристики двигательной установки РКН имели параметры, показанные на рис. 5.1. и в табл. 5.1.

### ЦИКЛОГРАММА ЗАПУСКА ДВИГАТЕЛЯ РКН

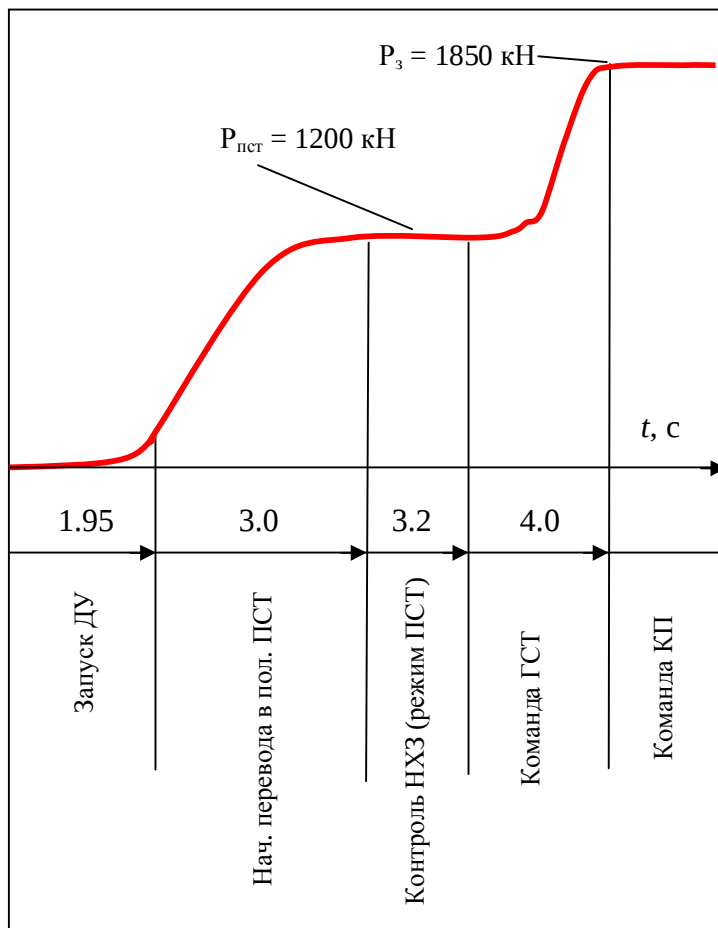


Рис. 5.1

Таблица 5.1

## Основные параметры двигателя РКН

| Основные параметры                  | Значение |
|-------------------------------------|----------|
| Тяга средняя, кН:                   | 1960     |
| Средний удельный импульс, кгс*с/кг: | 320      |
| Соотношение компонентов             | 2,75     |
| Массовый расход топлива, кг/с       | 630      |
| Горючее                             | керосин  |
| Окислитель                          | кислород |
| Масса двигателя, кг:                |          |
| - сухого                            | 2130±100 |
| - залитого                          | 2350±100 |

Для РКН принята заглубленная схема пусковой установки с одним газоходом.

Геометрические параметры пусковой установки, определяющие газодинамическую схему пуска РКН, находились из условий:

- обеспечения отвода газов двигателя от РКН;
- обеспечения допустимых уровней газодинамического воздействия на РКН;
- обеспечения условий подготовки к пуску и обслуживания РКН;
- обеспечения максимальных сроков безремонтной эксплуатации пусковой установки, которые получены из результатов проведенных аналитических исследований и экспериментов.

Для этого использовались соотношения, обеспечивающие минимизацию заданных параметров:

- система водяного охлаждения струи продуктов сгорания имеет расход  $\sim 900$  л/с;
- используются системы подачи воды в различных направлениях, в том числе и навстречу струе продуктов сгорания;
- металлооблицовки газоотражателя, стенок и донной части газохода выполнены из стали типа Ст3 с максимальной толщиной листов  $\sim 80$  мм.

Схема оптимизированной пусковой установки для РКН приведена на рис. 5.2. Следует отметить, что дополнительно длина выходной части газохода может быть уменьшена за счет рельефа местности. Указанные выше характеристики двигательной установки РКН учитывались также и при проведении газодинамических расчетов и экспериментальных исследований ударно-волновых нагрузок, которые оценивались в следующие последовательные моменты:

- при выходе двигательной установки на промежуточную ступень тяги (ПСТ);
- при выходе двигательной установки на главную ступень тяги (ГСТ);
- при аварийном выключении двигательной установки с режима ПСТ.

## СХЕМА ОПТИМИЗИРОВАННОЙ ПУ РКН

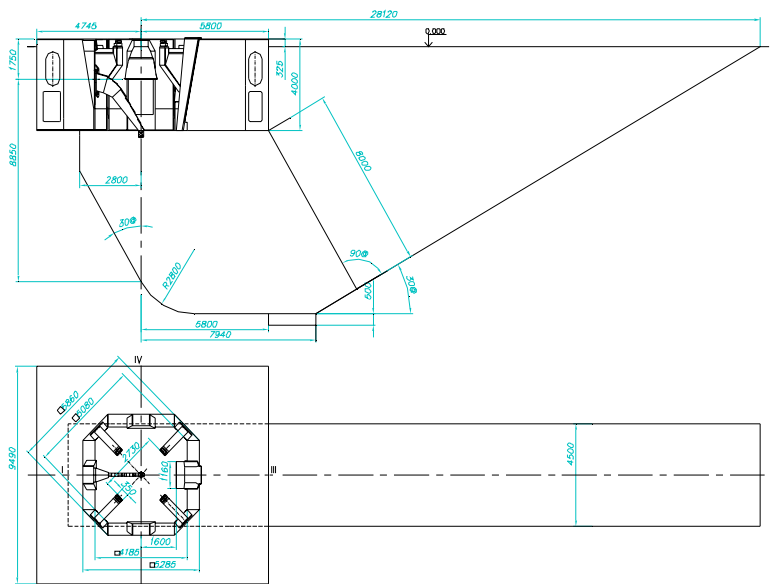


Рис. 5.2

Как показали теоретические исследования и эксперименты, параметры пускового режима двигательной установки и подачи воды в струю продуктов сгорания оказывают существенное влияние на уровни ударно-волнового давления.

Дополнительно было проверено влияние действия ветра на уровень пусковых нагрузок при пуске РКН. Установлено, что максимально допустимая скорость ветра может составлять 15 м/с.

Анализ результатов исследований с учетом накопленного опыта проведения аналогичных работ другими организациями позволяет сделать следующие выводы:

- максимальные ударно-волновые нагрузки в положительной фазе давления, действующие на донную часть РКН при запуске двигательной установки на режиме ПСТ с подачей в струю продуктов сгорания воды при реализации предложенной схемы пусковой установки, будут составлять не более 0,021 МПа;

- без подачи воды уровень ударно-волновых нагрузок достигает уровня 0,032 МПа;

- расчетные ударно-волновые нагрузки меньше допустимых нагрузок на ~15 %, что позволяет уточнить значения газодинамических нагрузок на защитные конструкции РКН и сократить массы таких конструкций более чем на 3 %.

Следует отметить, что в ходе экспериментов была подтверждена наибольшая допустимая продолжительность действия максимальных ударно-волновых нагрузок в положительной фазе давления с учетом нарастания и спада давления длительностью 0,25 с. Таким образом, можно уверенно утверждать, что использование реализованных в ходе исследований способов снижения воздействия струи продуктов сгорания на РКН повышает более чем на 30 % безопасность пуска по безударному выходу РКН при повышенных ветровых нагрузках.

Также при пуске РКН, начиная с момента включения двигательной установки первой ступени ракеты, будет иметь место приемлемое ( $170 \text{ кВт/м}^2$ ) тепловое воздействие на днище и нижнюю часть боковой поверхности РКН в результате излучений со стороны струи продуктов сгорания, а также со стороны раскаленной поверхности металлооблицовки газоотражателя и начала донной части газохода.

При этом экспериментальные исследования проводились для случая подъема РКН, близкого к верти-

кальному. Тогда как при расчете плотности тепловых потоков струи продуктов сгорания учитывались интегральные (по спектру частот) характеристики теплового излучения, углекислого газа и паров воды в составе продуктов сгорания при осредненных по объему начального участка струи значениях их статической температуры и статического давления, а также соответствующих им парциальных давлениях углекислого газа и паров воды. При этом значение диаметра излучающего цилиндрического газового объема было принято равным 1,43 м.

В результате выполненных исследований установлено, что максимальные значения плотности суммарных лучистых тепловых потоков от струи продуктов сгорания двигательной установки и поверхности металлооблицовки газоотражателя и газохода к днищу и нижней части боковой поверхности РКН на начальном участке ее подъема будут наблюдаться в течение около 2,3 с. после начала подъема РКН, при коэффициенте тяговооруженности  $k = 1,14$ , когда температура поверхности металлооблицовки газоотражателя и газохода имеет максимальное значение, а высота подъема РКН незначительна. В последующий период подъема РКН будет иметь место значительное снижение величины плотности лучистых тепловых потоков от поверхности металлооблицовки газоотражателя и газохода, сначала вследствие уменьшения угловых коэффициентов излучения, а затем также и из-за снижения температуры излучающей поверхности этих элементов пусковой установки. В результате этого плотность суммарных лучистых тепловых потоков к днищу и нижней части боковой поверхности РКН также будет снижаться. К моменту подъема РКН на высоту  $\sim 30$  м (в пересчете на натуру) лучистое тепловое воздействие на РКН от поверхности металло-

облицовки газоотражателя и газохода практически прекратится, и далее на днище и нижнюю часть боковой поверхности РКН будут действовать только лучистые тепловые потоки от струи продуктов сгорания двигательной установки.

Следует также отметить, что от момента запуска двигательной установки до момента окончания режима предварительной ступени тяги значения температуры поверхности металлооблицовки газоотражателя и газохода будут значительно меньше допустимых. Вследствие этого значения плотности лучистых тепловых потоков от этих элементов конструкции пусковой установки на днище и нижнюю часть боковой поверхности РКН будут очень незначительны, поэтому значения плотности суммарных лучистых тепловых потоков на эти зоны поверхности РКН в вышеуказанный период будут весьма близки к значениям лучистых тепловых потоков от струи продуктов сгорания двигательной установки.

Отсутствие длительного воздействия высоких температурных напряжений на элементы конструкции пусковой установки способствует увеличению ресурса и повышению сроков службы конструкций пускового устройства. По оценкам, основанным на опыте эксплуатации указанных конструкций, такое увеличение может быть более чем двукратным. Кроме того, по аналогичным причинам можно с уверенностью утверждать о сокращении количества одноразовых элементов (узлов разового действия), входящих в состав пусковых установок, более чем на 50 % по сравнению с аналогами, а как следствие, и количества и номенклатуры потребного ЗИП.

Отсутствие в технологии работ ряда операций, связанных с проверкой функционирования и заменой составных частей пусковой установки, сокращает время

проведения ремонтно-восстановительных работ примерно в 2 раза, а как следствие, может на четверть уменьшить количество обслуживающего персонала, участвующего в процессах подготовки к пуску РКН и в самом пуске.

В заключение следует отметить, что в ходе проведенных исследований подготовлен научно-технический задел и разработан проект ТЗ на математический моделирующий комплекс для проведения исследований газодинамических процессов, который позволит с использованием разработанных методик определения нагрузок на РКН и пусковые установки, а также рекомендаций по оптимизации параметров и конструкций пусковых установок для РКН минимизировать затраты на проведение газодинамических исследований.

Такая экономия достигается за счет высокоточного моделирования процессов газодинамики пуска РКН, основанного на современных алгоритмах расчета, включая алгоритм по конечно-элементной системе, а также использовании эмпирических зависимостей, которые получены на основе экспериментальных данных, служащих в данных методиках поправочными коэффициентами. Используя разработанный математический аппарат, возможно сократить объем экспериментальных исследований более чем в 2 раза, проверяя лишь контрольные точки определяющих параметров.



### **5.3. Обеспечение безопасности наземного технологического оборудования технических и стартовых комплексов на основе мониторинга его технического состояния**

Оценивание безопасности функционирования НТО ТК и СК, как было показано в предыдущих разделах работы, основано на значениях показателей технического состояния НТО ТК и СК. Среди агрегатов и систем НТО можно выделить элементы массового производства, к которым применимы статистические методы, объекты, адекватно описываемые физическими моделями, и узлы, для оценки показателей качества которых целесообразно применение физико-статистических подходов. Следует учесть, что имеются принципиальные отличия в подходах к оцениванию показателей технического состояния объектов массового производства и уникальных (мелкосерийных) объектов. В первом случае в качестве исходной информации используются результаты лидерной эксплуатации некоторой группы однотипных объектов. Затем вычисляются значения показателей качества объектов данной выборки тем или иным методом статистической обработки результатов наблюдений, и далее полученные результаты экстраполируются на всю генеральную совокупность объектов. Такой подход получил название статистического подхода к оцениванию показателей качества (рис. 5.3).

## КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ОЦЕНИВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ НТО КРК



Рис.5.3.

К факторам, ограничивающим применение статистического подхода, применительно к НТО КРК можно отнести следующие:

- точность и достоверность статистических оценок существенно зависят от объёма выборки объектов лидирующей группы, а сформировать достаточно представительную выборку в целом ряде случаев не представляется возможным;
- задача определения показателей качества ставится и решается для объектов, которые, с одной стороны, выполняют сложные и ответственные задачи, с другой стороны, их замена или полное восстановление ресурса требуют больших затрат

и занимают длительное время (например, стартовые комплексы РКН). Такие объекты уникальны и для них в принципе невозможно сформировать выборку для верхнего уровня иерархии системы;

- статистическая выборка должна быть однородной, поэтому объекты лидерной группы должны эксплуатироваться до предельного состояния в примерно идентичных условиях эксплуатации и режимах применения, что не всегда соблюдается для мелкосерийных объектов, эксплуатирующихся в особых, часто также уникальных условиях.

Вместе с тем статистический подход к оцениванию показателей технического состояния для ряда объектов и условий их применения имеет и ряд положительных сторон. К ним, в частности, можно отнести относительную простоту процедур сбора исходных данных (требуется только регистрация наступления событий и не требуется применять методы приборного контроля состояния объектов) и хорошо развитый математический аппарат статистической обработки результатов наблюдений. Кроме того, для ряда объектов с низким уровнем контролепригодности нет возможности проконтролировать процесс расходования ресурса по измеряемым параметрам.

Применительно к НТО КРК статистический подход может быть использован при оценивании и прогнозировании показателей долговечности отдельных составных частей однотипного оборудования массового или крупносерийного производства, в достаточной степени представленного в составе агрегатов и систем космических средств и обладающего ограниченной степе-

нью контролепригодности, когда нет возможности оценить показатели качества по измеряемым параметрам.

Обойти приведенные выше ограничения для уникального оборудования НТО ТК и СК позволяет использование подхода на основе физического моделирования процессов старения (несколько реже встречаются наименования вероятностно-физического подхода или подхода на основе анализа физики отказов).

Сущность физического моделирования заключается в выявлении и описании устойчивых необратимых закономерностей изменения внутренних свойств материала элементов объекта под воздействием эксплуатационных факторов.

К основным физико-химическим процессам, приводящим к изменению физических свойств материалов, относятся следующие микропроцессы: диффузия, химическая деструкция, адсорбция, распад твёрдых растворов, изменение механических, электрических и магнитных свойств твёрдых тел. Они являются причиной более сложных деградационных макропроцессов, которые проявляются при эксплуатации оборудования: коррозии, эрозии, износа, теплового старения, высокоцикловой и малоцикловой усталости, ползучести, деформаций. Эти процессы развиваются под воздействием комплекса эксплуатационных факторов: динамических и статических механических нагрузок, термогидравлических и тепловых ударов, взаимодействия теплоносителя с конструктивными элементами, переноса и осаждения продуктов коррозии, примесей и т. д.

Изменения в материалах на макроскопическом уровне приводят к изменению показателей качества элементов во времени, что, в свою очередь, обуславливает накопление постепенных изменений на следующем иерархическом уровне – уровне функциональных узлов,

систем и агрегатов, комплексов. Численные значения показателей качества рассчитываются на основе физических моделей, описывающих взаимосвязь действующих эксплуатационных факторов и фактических значений физических характеристик объекта с его текущими показателями качества.

Преимущество подхода на основе физического моделирования перед статистическим заключается, во-первых, в принципиальной возможности индивидуальной оценки показателей качества объекта до получения опыта его эксплуатации в различных условиях, во-вторых, в существенном снижении степени неопределённости оценок показателей качества, возникающей из-за индивидуальных различий эксплуатационных факторов, воздействующих на каждый образец космических средств, по сравнению с лидерными образцами.

Но вместе с тем, как правило, остается не полностью определённым весь перечень физико-химических процессов деградации материалов элементов в конкретных условиях эксплуатации, не известны точно все физические характеристики элементов, не полностью определен перечень и значения дестабилизирующих воздействий, не известен механизм детального взаимовлияния различных процессов деградации, вносится погрешность измерительных приборов. Это ограничивает область применения подхода на основе физического моделирования отдельными типовыми элементами и узлами, для которых возможен учет явлений, имеющих стохастическую природу, путем введения соответствующих коэффициентов (отсюда и название подхода – вероятностно-физический).

Тем не менее для большей части оборудования изменение показателей качества может быть оценено по изменению некоторой совокупности параметров, изме-

рение которых возможно провести приборами неразрушающего контроля. Методологической основой оценивания показателей качества в данном случае являются методы прогнозирования возможных изменений в элементах оборудования на основе рядов значений параметров, определяющих их состояние, которые получают в результате измерений методами неразрушающего контроля. Данный подход получил название физико-статистического.

Преимущество физико-статистического подхода перед статистическим заключается в возможности учета фактического технического состояния и получения индивидуального прогноза его изменения, что позволяет существенно снизить неопределённость оценок показателей качества. В данном случае осуществляется переход от неопределённости знаний характеристик ресурсов группы объектов в широком спектре условий эксплуатации к неопределённости знаний характеристик ресурса конкретного объекта в конкретных условиях эксплуатации.

По сравнению с подходом на основе физического моделирования данный подход позволяет использовать ограниченный набор параметров, контроль которых возможен на текущем этапе жизненного цикла, и вместе с тем дает возможность адаптировать исходную физико-статистическую модель к конкретному образцу космических средств на основе результатов контроля его фактического состояния.

Следует отметить, что неопределённость знаний о показателях качества не устранима полностью, потому что, как правило, остается не полностью определённым характер деградации свойств элементов в конкретных условиях эксплуатации, ограничен интервал наблюдения за определяющими параметрами, возможны ошибки

измерений параметров, ограничена точность приборов неразрушающего контроля.

Эти факторы обуславливают вероятностный характер прогнозов показателей долговечности физико-статистическими методами и необходимость применения соответствующих статистических процедур обработки результатов контроля определяющих параметров.

Реализация физико-статистического подхода требует осуществления комплекса мероприятий научно-методического и организационного плана:

- обоснования перечня контролируемых параметров объекта;
- обоснования состава и метрологических характеристик приборной базы неразрушающего контроля;
- определения периодичности контроля параметров;
- проведения периодических измерений параметров;
- оценивания точности и достоверности результатов прогнозирования показателей долговечности по результатам контроля.

Такие мероприятия требуют определённых затрат времени, средств и соответствующего уровня квалификации специалистов. В связи с этим целесообразность использования физико-статистических методов оценивания показателей качества определяется соотношением получаемого положительного эффекта от применения подхода с уровнем затрат на его практическую реализацию.

Таким образом, в ходе разработки общей методики оценивания безопасности функционирования НТО КРК получена формальная постановка задачи исследования.

По результатам анализа выработан перечень работ, которые необходимо поэтапно выполнить для достижения цели исследования:

- используя аппарат структурного анализа, произвести декомпозицию НТО КРК и построить структурную модель НТО КРК;
- для каждого структурного элемента НТО КРК определить метод прогнозирования технического состояния, перечень контролируемых параметров и сформировать полное множество измерительных комплексов для диагностирования технического состояния НТО КРК;
- на основе структурной модели НТО КРК и данных по измерительным комплексам сформировать модель эксплуатации НТО КРК, описывающую зависимость между техническим состоянием НТО КРК и затратами на диагностирование технического состояния элементов НТО РКК и обеспечение ЗИП;
- на основе метода динамического программирования разработать процедуру расчета оптимального распределения средств по элементам ЗИП НТО КРК;
- на основе метода динамического программирования разработать методику определения оптимального состава измерительных комплексов системы диагностики и соответствующего оптимального состава ЗИП НТО КРК;
- реализовать разработанные процедуры, методики и алгоритмы в виде прикладных программных комплексов;



- провести экспериментальную отработку разработанного программного обеспечения на примере НТО КРК.

К НТО КРК предъявляются повышенные требования по надежности и безопасности функционирования, выполнение которых на гарантийном периоде эксплуатации достигается:

- объемом первоначально поставленного ЗИП;
- плановым проведением технических обслуживаний;
- проведением контрольных проверок на функционирование перед проведением штатной работы;

а также рядом других мероприятий, предусмотренных в ГОСТах РФ по организации эксплуатационных процессов.

На послегарантийном этапе эксплуатации обеспечение требуемых показателей качества функционирования НТО КРК осложняется значительной долей неопределенности в принятой сейчас практике оценивания и прогнозирования технического состояния агрегатов и систем. Это вызвано следующими причинами:

- отсутствием опыта длительной эксплуатации НТО КРК;
- повышением интенсивности эксплуатации по отношению к расчетным значениям из-за доработок, введения новых технологических операций, не предусмотренных техническим заданием на проектирование технологического оборудования.

Кроме того, дополнительные трудности в предсказании технического состояния технологического оборудования могут быть вызваны изменением конструкции РКН (увеличением массы полезной нагрузки, уменьше-

нием массы теплозащиты, изменением режимов функционирования системы термостатирования и др.).

Неопределенность в оценке и прогнозировании технического состояния комплекта требует формирования такого комплекта ЗИП, который бы гарантировал устранение любых потенциально возможных отказов. Однако создание даже избыточного ЗИП, составленного в рамках существующих нормативов комплектования, не снимает всех отмеченных неопределенностей и сохраняет ряд технических и финансовых рисков, которые характерны для принятой сейчас стратегии эксплуатации КРК.

Решение проблемы обеспечения надежной и безопасной эксплуатации КРК за пределами гарантийного срока службы возможно одним из альтернативных путей.

Первый путь связан с созданием для КРК такого количества ЗИП, которое бы гарантировало устранение любых отказов НТО КРК при подготовке и пуске РКН. Это потребует в рамках существующей стратегии эксплуатации и дополнительных неопределенностей заказывать ЗИП большего объема и номенклатуры, чем требуется по ГОСТ В26647-85 «Комплекты ЗИП изделий космической техники». Возможно, при таком подходе через 12 лет часть дорогостоящих элементов окажется невостребованной, но по срокам хранения потребует списания.

Второй путь связан с включением в существующую систему эксплуатации КРК нового элемента – системы научно-технического сопровождения эксплуатации, которая представляет собой совокупность следующих составляющих:

- научно-методического обеспечения;
- приборных средств неразрушающего контроля в составе измерительных комплексов;
- аттестованных специалистов для решения задач мониторинга технического состояния НТО КРК непосредственно в условиях эксплуатации, прогноза технического состояния с целью выработки оперативных предложений по поддержанию НТО КРК в работоспособном состоянии с требуемыми показателями надежности и безопасности;
- штата научных сотрудников и соответствующего программного обеспечения, позволяющего по результатам мониторинга осуществлять прогнозирование технического состояния НТО КРК, рассчитывать и уточнять ЗИП, разрабатывать перечень ремонтных мероприятий, совершенствовать по результатам экспериментальных данных научно-методическое обеспечение.

Научно-методическое обеспечение состоит из совокупности методик, программ по обследованию элементов технологического оборудования приборными средствами неразрушающего контроля, методик расчета и прогнозирования показателей технического состояния оборудования СК и ТК, компьютеризованной информационной системы. Приборные средства для мониторинга и диагностирования можно разделить на несколько групп:

- приборы для контроля физико-механических свойств материалов металлоконструкций и обнаружения в них дефектов;
- приборы для измерения электромагнитных характеристик оборудования;

- оборудование и приборы выявления дефектов, проявляющихся через характеристики температурного поля;
- приборы для обнаружения негерметичности элементов оборудования;
- оборудование и приборы для выявления дефектов через вибропараметры элементов технологического оборудования;
- оборудование для выявления биологического воздействия на элементы оборудования;
- приборы визуально-измерительного контроля.

Решение задач мониторинга на объекте может осуществлять группа специалистов, подготовленная и аттестованная в установленном в РФ порядке. Разработку методического обеспечения и обработку результатов мониторинга осуществляет специализированная научная организация.

Деятельность специалистов, оснащенных указанными выше методическими материалами и приборами, предполагает проведение накануне работ по подготовке и пуску РКН и в течение этих работ мониторинга технического состояния элементов технологического оборудования для раннего выявления предотказного состояния, диагностики и освидетельствования оборудования, выработавшего установленный ресурс (срок службы). По результатам проведенных работ научно обоснованно определяется объем ремонтно-профилактических и ремонтно-восстановительных мероприятий, заказывается допоставка ЗИП.

Таким образом, теоретические исследования состоят в разработке научно-методического обеспечения и включают в себя следующие задачи:

- декомпозиция НТО КРК до уровня составных элементов ЗИП и построение структурной модели НТО КРК;
- определение методов прогнозирования технического состояния, перечня контролируемых параметров, состава измерительных комплексов для диагностирования технического состояния полученных структурных элементов НТО КРК;
- разработка метода технико-экономического обоснования затрат на диагностирование технического состояния элементов НТО КРК и обеспечение ЗИП;
- разработка процедуры расчета оптимального распределения средств по элементам ЗИП НТО КРК;
- разработка методики определения оптимального состава измерительных комплексов системы диагностики и соответствующего оптимального состава ЗИП НТО КРК.

Экспериментальные исследования заключаются в отработке разработанного методического и программного обеспечения на примере отдельного НТО КРК и проверке правильности выводов об эффективности использования разработанного подхода.

Таким образом, определен характер проводимых исследований:

- для теоретических исследований это разработка научно-методического обеспечения;
- для экспериментальных исследований это отработка разработанного методического и программного обеспечения.

Кроме того, определено содержание теоретических исследований, которое заключается в следующем:

- построение структурной модели НТО КРК;
- определение методов прогнозирования технического состояния, перечня контролируемых параметров, состава измерительных комплексов;
- разработка методического обеспечения распределения средств на диагностирование технического состояния элементов НТО КРК и обеспечение ЗИП;
- разработка процедур расчета оптимального распределения средств по элементам ЗИП НТО КРК;
- разработка методики определения оптимального состава измерительных комплексов системы диагностики и соответствующего оптимального состава ЗИП НТО КРК.

Для решения этих задач в интересах обеспечения требуемого уровня безопасности и надежности функционирования технологического оборудования СК и ТК, в рамках КУБ разработан и введен в эксплуатацию конструкторско-моделирующий комплекс, одной из задач которого является оценка и прогнозирование технического состояния НТО ТК и СК при авторском и техническом надзоре за эксплуатацией КРК силами Минобороны, а также комплексов, эксплуатируемых силами филиала КБТМ в городе Байконуре и вахтовым персоналом КБТМ на РКК «Морской старт» в базовом порту Лонг Бич (США).

Созданный КМК благодаря использованию специального прикладного программного обеспечения позволяет на основе измеряемых параметров давать оценку технического состояния НТО ТК и СК, а также необхо-

димости корректировки конструкторской документации в части контроля над формированием и восполнением ЗИП. Кроме того, КМК обладает возможностью проведения комплексной увязки базовых конструкторских решений по НТО ТК и СК и экспериментальной информации о техническом состоянии эксплуатируемого НТО КРК. Впервые с использованием специального программного обеспечения КМК открылись возможности оптимизации затрат на эксплуатацию НТО ТК и СК и повышения его рентабельности, а также проведения корректировки соответствующей документации (ведомостей ЗИП, инструкций по обслуживанию и др.) на основании экспериментальной информации о техническом состоянии НТО КРК с обращением к базе данных конструкторских и эксплуатационных документов. Разработанные базы данных и структура КМК позволяют при выборе проектно-конструкторских решений по новым КРК использовать обобщенную экспериментальную информацию о техническом состоянии уже эксплуатируемого НТО КРК с учетом динамики изменения такого состояния в течение жизненного цикла объекта исследования.

Аппаратная часть КМК состоит из персональных компьютеров со следующими характеристиками: Pentium IV, 3 ГГц, LAN-модуль (400 кГц), жесткий диск 120 Гбайт, монитор 19". Кроме того, в аппаратную часть КМК входит периферийное оборудование со следующими характеристиками: сетевые концентраторы, устройства ввода информации, устройства вывода информации, устройства хранения информации.

КМК позволяет выполнять следующие функции:

- электронный (безбумажный) документооборот, включая перевод чертежей, выполненных на бумажном носителе, в формат системы САПР, а

также конвертация и преобразование форматов хранения графических данных;

- создание «тяжёлых» параметризованных трёхмерных моделей и работа с ними, включая их кинематический и динамический анализ, получение двухмерных видов и сечений для вывода информации на бумажный носитель;
- создание гидро-, пневмо- и электросхем (мнемосхем), а также чертежей прокладки трубопроводов и раскладки электрических кабелей в соответствии со схемами;
- создание собственных баз данных по компонентам, включая ЗИП, а также базы данных отказов в ходе эксплуатации объекта;
- использование программ расчета трубопроводов и газодинамических и прочностных расчетов, а также моделирующих программ;
- ввод и обработка данных измерительных комплексов для оценки и прогнозирования технического состояния НТО РКК и для регистрации и анализа акустического шума.

Кроме того, в состав КМК входят следующие составные части измерительных комплексов, имеющие приведенные ниже характеристики:

### **1. Измерительный комплекс для оценки технического состояния НТО ТК и СК:**

Толщиномер «Булат-1S»:

- диапазон контролируемых толщин: от 1,2 до 100 мм;
- скорость распространения ультразвука: *const*;
- основная погрешность измерения: не более  $0,01T+0,1$  мм;



- габаритные размеры: 120×60×25 мм;
- температурный диапазон: от минус 10 до плюс 40 °С.

Ультразвуковой высокочастотный дефектоскоп УД2ВП:

- рабочие частоты: от 1 до 10 МГц;
- скорости звука: от 1000 до 9999 м/с;
- частота следования зондирующих импульсов: 25, 100, 200, 400 Гц;
- регулировка усиления: от 0 до 80 дБ, с шагом 1 дБ;
- диапазон временной регулировки чувствительности (ВРЧ): 80 дБ;
- развертка: от 4,5 до 300 мкс (развертка задается в мм, в зависимости от скорости звука);
- отсечка компенсированная, от 0 до 80 % высоты экрана;
- автоматическая сигнализация дефектов (АСД) – двухканальная, световая и звуковая (с отключением), уровень срабатывания от 5 до 95 % высоты экрана, настройка срабатывания (выше или ниже порога);
- методы контроля: эхо-метод, теневой метод;
- вывод информации на внешние устройства: интерфейс RS 232 для выводов результатов контроля;
- логические сигналы о наличии дефектов в зонах контроля;
- питание: аккумуляторы (6 шт.) или блок питания, 9В, 1А;
- габариты: 220×120×150 мм;
- масса: 3,5 кг (без аккумуляторов).

### Ультразвуковой дефектоскоп общего назначения УДЗ-204:

- диапазон толщин контролируемого материала (по стали): от 2 до 5000 мм;
- рабочие частоты: 1,25; 1,8; 2,5; 4,0; 5,0; 10,0 МГц;
- диапазон регулировки усиления: от 0 до 100 дБ;
- шаг регулировки усиления: 0,5 или 1,0 дБ;
- диапазон установки скорости УЗК: от 1000 до 8000 м/с;
- глубина регулировки ВРЧ: 60 дБ;
- отсечка линейная, от 0 до 100 % высоты экрана;
- диапазон рабочих температур: от минус 20 до плюс 50 °С;
- габариты: не более: 245×145×75 мм;
- масса с аккумулятором: не более 3 кг.

### Виброметр ВК-5:

- диапазон измерений: виброскорости от 0,2 до 70 мм/с; виброперемещения от 1 до 700 мкм;
- полоса частот измерения: виброускорения от 2 до 4000 Гц; виброскорости от 2 до 2800 Гц;
- пределы основной погрешности на базовой частоте: 6 %.

### Виброанализатор «Кварц»:

- частотный диапазон: от 0,3 до 40 кГц;
- погрешность измерения: до 5 %.

### Ультразвуковой обнаружитель негерметичностей УДЗ-204 «Пеленг»:

- расстояние от контролируемой поверхности: от 0,1 до 4,0 м;
- минимальный диаметр выявляемого отверстия: до 0,08 мм;

- резонансная частота приемника (генератора):  $40 \pm 3$  кГц;
- питание: аккумуляторная батарея 7Д 0,125;
- габариты генератора и приемника: 190×62×32 мм;
- масса приемника: 0,3 кг;
- масса генератора: 0,3 кг.

Ультразвуковой томограф для бетона «А1230»:

- диапазоны глубин просмотра в бетоне: от 0 до 350, от 0 до 700, от 0 до 1050 мм;
- диаметр минимального обнаруживаемого дефекта: 50 мм;
- погрешность измерений глубины:  $\pm 10$  %;
- рабочая частота ультразвука: 55 кГц;
- питание: 4 элемента или аккумулятора типа АА;
- продолжительность работы от батареи: не менее 10 часов;
- габаритные размеры антенного устройства: 145×90×75 мм;
- масса антенного устройства: 0,76 кг;
- габаритные размеры электронного блока: 234×98×33 мм;
- масса электронного блока: 0,8 кг.

Тестер для бетона УК 1401:

- диапазон скоростей УЗ: от 1500 до 9999 м/с;
- диапазон измерений глубины трещин: от 10 до 50 мм;
- масса: 0,350 кг.

Пирометр ThermoPoint 64+:

- диапазон: от минус 32 до 600 °С;
- оптика: 30:1;
- расстояние: до 4.5 м;

- точность: 1 %;
- коэффициент излучения: от 0,01 до 1,00;
- разъем для термопары: К.

#### Тензостанция А17-Т8:

- количество аналоговых входов: 8;
- частотные диапазоны одновременно анализируемых сигналов: от 0 до 1, от 0 до 10, от 0 до 100, от 0 до 1000, от 0 до 10000 Гц;
- частота преобразования по каждому каналу: до 50 кГц;
- количество разрядов АЦП: 16;
- антиэлайзинговая фильтрация сигналов: до 10 кГц;
- максимальное входное напряжение при единичном коэффициенте усиления:  $\pm 10$  В;
- программируемые коэффициенты усиления: 20, 40, 60 дБ;
- динамический диапазон: 90 дБ;
- идентичность каналов в полосе пропускания: 0,1 %;
- межканальная разность фаз: 1 град на 10 кГц;
- уровень собственных шумов во всей полосе пропускания при максимальном коэффициенте усиления, приведенный к входу: 1.

## **2. Измерительный комплекс для регистрации и анализа акустического шума:**

- анализатор сигналов с блоком питания и высокочастотными коммутационными модулями, работающими с частотой 204,8 кГц;

- высокочастотные микрофоны с предусилителем, работающие в следующих диапазонах: 4-70000 Гц, 42-172 дБ;
- блок управления с двумя процессорами по 3 ГГц, с 4 LAN-модулями по 400 кГц и двумя жесткими дисками по 120 Гбайт.

На основе измеренных параметров была откорректирована конструкторская документация по ряду наиболее ответственных систем КРК «Зенит-М» и комплекса «Морской старт». Указанные комплексы включают в свой состав около 30 % общего числа разработанных КБТМ систем и агрегатов, находящихся в настоящее время в эксплуатации. С использованием программно-аппаратных средств КМК ведутся работы по разработке проектной и конструкторской документации на составные части СК и ТК.

Так, в ходе разработки УСК «Ангара» была выполнена комплексная увязка агрегатов стартового оборудования в стартовом сооружении, компоновка и установка оборудования в помещениях указанного сооружения и разводка коммуникации, обеспечивающая заданные показатели безопасности. Также в ряде подразделений КБТМ с использованием КМК организован электронный безбумажный документооборот. С помощью программных средств КМК проводятся до 80 % расчетов, выполняемых КБТМ в ходе создания НТО ТК и СК. Кроме того, КМК обеспечивает решение следующих задач:

- проведение проектно-конструкторских работ по созданию сложных технических систем с использованием возможности трехмерного моделирования, кинематического расчета, компоновки и

взаимной увязки в пространстве сложных объектов НТО СК;

- проведение расчетов уровней безопасности создаваемого НТО и сложных технических систем с использованием численных методов;
- организация электронного документооборота на предприятии численностью до 1000 человек;
- проведение измерений и обработки результатов анализа акустического шума, например в ходе проведения модельных газодинамических испытаний;
- проведение измерений и обработки результатов технического состояния НТО ТК и СК методами неразрушающего контроля, позволяющими дать их оценку в ходе осуществления обслуживания и регламентных работ, а также при необходимости внести корректировку в эксплуатационную документацию.

Кроме того, КМК является основой для функционирования локальной вычислительной сети КБТМ, обеспечивающей сетевое взаимодействие между его структурными подразделениями.

Наиболее эффективно результаты выполненных работ могут быть использованы при создании и эксплуатации стартовых и технических комплексов РКН легкого, среднего и тяжелого классов.

Использование созданной материальной базы КМК позволяет КБТМ обосновывать структуру и состав ЗИП, в том числе и для эксплуатируемого им в настоящее время РКК «Морской старт».

В результате дополнительная прибыль КБТМ по проекту «Морской старт» предварительно составит около 22 млн. руб.:

- стоимость проектных материалов по оптимизации состава ЗИП, разрабатываемых КБТМ, – 4 млн. руб. при повышении уровня рентабельности (за счет перехода на КМК) – 20 % (дополнительная прибыль 0,8 млн. руб.);
- экономия компании «See Launch» от оптимизации состава ЗИП – 105 млн. руб. при отчислениях за использование патентов КБТМ (20 % от указанной экономии) – 21 млн. руб.

В настоящее время ведутся аналогичные работы с использованием средств КМК в ходе выполнения проекта «Наземный старт» – модернизация КРК «Зенит» для обеспечения возможности пусков РН «Зенит» с двумя типами разгонных блоков: ДМ и «Фрегат». По этому проекту дополнительная прибыль КБТМ должна составить 17,5 млн. руб.:

- стоимость разрабатываемых КБТМ проектных материалов по оптимизации состава ЗИП – 4,8 млн. руб., повышение уровня рентабельности (за счет перехода на КМК) – 20 % (дополнительная прибыль – 0,8 млн. руб.);
- ожидаемая экономия потребителя услуг от оптимизации состава ЗИП НТО СК, в том числе и элементов стартового сооружения, – 83,5 млн. руб. при отчислениях за использование патентов КБТМ – 20 % от экономии (16,7 млн. руб.)

Передовые технологии, используемые в КМК, будут реализованы при выполнении проектов государственных заказчиков по Федеральной космической программе, а также в интересах Минобороны России. Ожидаемая дополнительная прибыль КБТМ от реализации этих проектов при сохранении цен на товарную продук-

цию в пределах, установленных в заключенных на сегодняшний день КБТМ договорах и контрактах, составит 5,2 млн. руб., стоимость разрабатываемых КБТМ проектных материалов по оптимизации состава ЗИП – 31,2 млн. руб., повышение уровня рентабельности (за счет КМК) – 20%.

По договорам и контрактам в ходе традиционной деятельности, ведущейся КБТМ, дополнительная прибыль за первые два года эксплуатации КМК составила 44,7 млн. руб.

Кроме того, использование КМК позволило создать высокоэффективные рентабельные технологии комплексной оценки технического состояния сложных технических комплексов и НТО в различных отраслях народного хозяйства, а также построения и внедрения в народное хозяйство широкого спектра технических комплексов для разработки рекомендаций по защите от акустического шумового воздействия на окружающую природную среду, человека и промышленное оборудование.

При этом проработаны следующие три направления:

- выполнение заказов различных отраслей народного хозяйства с использованием созданных в КБТМ рабочих мест, а также КМК и измерительных комплексов;
- организация серийного выпуска и модификация созданных в процессе выполнения проекта КМК и измерительных комплексов;
- сервисное обслуживание реализованных комплексов, а также подготовка и переподготовка эксплуатирующего персонала потребителей.



В ходе дальнейшего развития КМК будет оснащен новым программным обеспечением, а также аппаратными средствами, позволяющими иметь распределенный комплекс с удаленными абонентами на местах эксплуатации НТО СК и ТК, в результате чего появится возможность проведения оценки технического состояния и принятия решений специалистами КБТМ в реальном масштабе времени.

Наибольшая доля информации о НТО КРК связана с техническим состоянием эксплуатируемого оборудования и его изменением. Переход на ресурсосберегающие технологии потребовал при принятии решений по вопросам управления эксплуатацией всестороннего анализа как технических, так и экономических факторов. Первым шагом на этом пути стало создание необходимой информационной основы управления.

Для решения этой задачи в КМК существующая система информации о техническом состоянии НТО КРК дополнена системой мониторинга состояния наземной космической инфраструктуры, которая охватывает все аспекты ее (инфраструктуры) функционирования, как технические, так и организационные.

При этом под мониторингом понимается информационно-аналитический процесс обеспечения выработки управленческих решений, направленных на предотвращение неблагоприятного изменения состояния объекта мониторинга. Он включает в себя совокупность последовательных действий информационного и аналитического характера:

- наблюдение за объектом мониторинга и сбор информации о его состоянии;
- оценка текущего состояния объекта мониторинга и прогноз его изменения;

- подготовка вариантов управленческих решений с оценкой риска их принятия.

Для определения остаточного ресурса НТО ТК и СК были разработаны методики индивидуального прогнозирования безотказности каждого агрегата, основанные как на выполненных текущих оценках их состояния, так и на анализе конструкторской и эксплуатационной документации на эти агрегаты. Одновременно с этим предусматривается постоянное уточнение прогнозных оценок за счет введения систематического контроля состояния агрегатов методами неразрушающего контроля.

Развитие системы мониторинга в космической отрасли в последние годы характеризуется расширением круга объектов наземной космической инфраструктуры, для которых стали решаться задачи продления ресурса и предотвращения отказов в период применения по назначению за счет своевременного определения предотказного состояния их оборудования и выполнения соответствующих ремонтно-профилактических работ. Вслед за СК в систему мониторинга были включены ТК, заправочно-нейтрализационные станции, сети водоснабжения и водоканализации, ТЭЦ, высоковольтные линии электроснабжения и другие объекты инфраструктуры космодрома. Заметим, что все вышесказанное относится в основном к мониторингу только технического состояния объектов НТО КРК.

Однако в условиях ограниченного бюджетного финансирования все более важной становится задача получения объективной картины затрат на эксплуатацию объектов НТО КРК и подготовку к пуску РКН, а также выявления возможностей их сокращения.

Для обеспечения экономичной эксплуатации космических средств важным является не только снижение эксплуатационных затрат, но и обеспечение своевременности запуска КА или по крайней мере минимизация задержек пуска РКН, ибо последние в случае выполнения коммерческих запусков КА сопровождаются неустойками больших размеров. Для решения этой задачи необходимо знать характеристики эксплуатационных процессов и отдельных работ, от которых зависит величина задержки пуска РКН, например продолжительность ремонта и количество ложных ремонтов, количество ошибок I и II рода при контроле технического состояния оборудования, нештатные ситуации и сопровождающие их признаки, решения, принятые для их устранения, и результаты их выполнения, время доставки ЗИП и др.

Сбор такой информации в настоящее время не осуществляется. Поэтому чрезвычайно остро стоит задача обоснования структуры и алгоритмов функционирования информационной подсистемы, предназначенной для сбора и обработки данных о характеристиках эксплуатационных процессов.

Очевидно, что совокупность этих данных, а также данных мониторинга технического состояния всей инфраструктуры КРК будет являться информационной основой для решения широкого спектра задач технико-экономического обоснования управленческих решений.

В заключение необходимо отметить, что суммарный поток данных, циркулирующих в системе информации о техническом состоянии объектов НТО КРК, дополненной системой мониторинга, на сегодняшний день столь велик, что переработка его традиционными методами и средствами входит в резкое противоречие с возрастающими требованиями к качеству управленче-

ских решений. Иными словами, КУБ и его подсистема в виде КМК, обеспечивающая автоматизацию управления НТО ТК и СК, позволяет повысить приспособленность системы эксплуатации к решению задач своевременного управления надежностью и безопасностью процессов подготовки и пуска РКН.

#### **5.4. Обеспечение безопасности функционирования наземного технологического оборудования технических и стартовых комплексов на основе адаптивного управления ЗИП**

Одним из практических результатов использования разработанных здесь положений о КУБ явилась необходимость в изменении стратегии управления ЗИП для НТО ТК и СК.

Эксплуатация НТО ТК и СК предусматривает два основных режима функционирования, связанных с запуском РКН: подготовку к штатной работе и штатную работу. Во время подготовки к штатной работе осуществляются операции, связанные с подготовкой, проверкой функциональности НТО ТК и СК, например заполнение емкостей хранилищ КРТ, проверки на функционирование заправочного, стартового оборудования, оборудования термостатирования КГЧ и КРТ, отработка действий расчета обслуживающего персонала. Во время штатной работы ряд систем находятся в готовности к немедленному включению (режим дежурства), ряд систем работают непрерывно, обеспечивая требуемые условия проведения штатной работы (режим непрерывного функционирования), часть систем включаются для проведения конкретных технологических операций по

проверке исправности бортовых систем, подготовке, заправке и пуску РКН.

Таким образом, для НТО ТК и СК характерна цикличность функционирования с контролем технического состояния оборудования перед проведением штатной работы. В процессе применения по назначению НТО КРК функционирует в одном из следующих режимов:

- режим дежурства (например, системы термостатирования). Для этого режима характерно поддержание какого-либо параметра или группы параметров на заданном уровне. Кратковременная неисправность системы термостатирования не приводит к тяжелым последствиям. Только длительное нарушение работоспособности может привести к невыполнению задачи стартовым комплексом;
- режим непрерывного функционирования (например, системы энергоснабжения). В этом режиме системы и агрегаты функционируют непрерывно. Чаще всего системы, предназначенные для работы в этом режиме, имеют структурное резервирование;
- режим кратковременного функционирования (например, подъемно-установочный агрегат). Данный режим является наиболее критичным с точки зрения надежности, так как не существует возможности резервирования. Отказ в этом режиме приводит к тяжелым последствиям, в том числе аварии или катастрофе.

Схематически анализ последствий отказов различных групп НТО ТК и СК показан на рисунке 5.4.

## ПОСЛЕДСТВИЯ ОТКАЗОВ РАЗЛИЧНЫХ ГРУПП НТО КРК

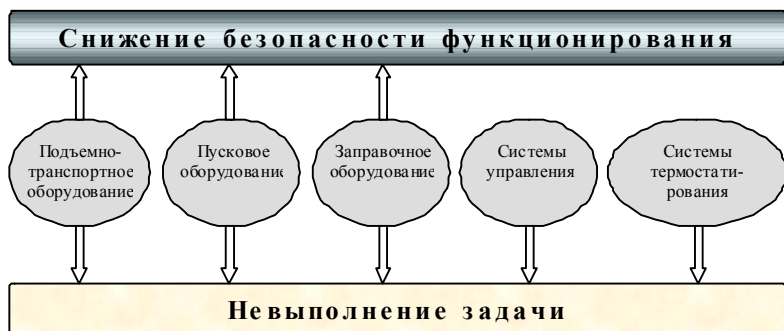


Рис. 5.4

Последствия отказов НТО ТК и СК можно разделить на приводящие к снижению безопасности и приводящие к невыполнению задачи по запуску РКН в заданное время. В то же время при функционировании НТО ТК и СК присутствуют отказы, которые могут привести и к тем и к другим последствиям. К снижению безопасности приводят отказы, в результате которых происходит пролив КРТ (отказы заправочного оборудования). К невыполнению задачи по запуску РКН приводят отказы, влекущие снятие РКН с пускового устройства или задержку пуска (отказы стартового оборудования, систем термостатирования, систем управления). К снижению безопасности и невыполнению задачи приводят отказы, способные повлечь взрыв РКН, падение, а также любое другое повреждение РКН (отказы подъемно-транспортного, пускового и заправочного оборудования).

Таким образом, необходимо отметить следующие особенности НТО ТК и СК:

- разная интенсивность режима функционирования;
- разветвленность структуры комплексов и их элементов;
- преобладание уникального и малосерийного оборудования;
- большое количество базовых элементов;
- высокая цена отказа элементов;
- деление оборудования на группы (механическое оборудование, электротехническое, гидравлическое и т. д.), что позволяет применять сходные методики для определения технических параметров элементов одной группы.

Одной из главных проблем при эксплуатации НТО ТК и СК является то, что в настоящее время эксплуатация большинства ракетно-космических комплексов осуществляется за пределами назначенного ресурса и срока службы. В связи с этим приоритетным направлением совершенствования системы эксплуатации КРК является внедрение технологий планирования эксплуатационных процессов на основе измерительной информации о фактическом значении параметров, характеризующих техническое состояние.

При поставке нового оборудования для КРК, в целях обеспечения требуемых показателей надежности и ресурса систем в течение назначенного срока эксплуатации, вместе с ним поставляют ЗИП на весь назначенный срок эксплуатации ( $10 \div 15$  лет эксплуатации). Однако в начале эксплуатации техника практически не выходит из строя и ЗИП остается невостребованным. В результате длительной эксплуатации элементы оборудо-

вания достигают предельного состояния и заменяются запасными, уже израсходовавшими часть ресурса в процессе хранения. По истечении назначенного срока эксплуатации при продлении ресурса часть элементов ЗИП требует замены, так как при хранении они израсходовали свой ресурс и утратили эксплуатационные свойства. В результате часть элементов ЗИП, которые даже не были в эксплуатации, заменяются на новые. Кроме того, создание в начальный момент ЗИП на срок их хранения «замораживает» значительные денежные средства. С другой стороны, уменьшение запасов снижает надежность систем и приводит к тому, что не обеспечивается выполнение задач в штатном режиме. Причины указанных недостатков систем обеспечения запаса следующие:

- значения показателей надежности элементов НТО ТК и СК, принимаемые при расчетах конструкторами, в силу своей усредненности являются приближенными и малодостоверными, не отражающими специфику эксплуатации и статистическую неоднородность оборудования;
- при расчетах принимается допущение о том, что интенсивность отказов постоянная, хотя фактически элементы стареют и интенсивность отказов растет;
- поставка ЗИП на длительный срок не позволяет корректировать состав ЗИП как по количеству, так и по номенклатуре в зависимости от фактической интенсивности отказов в ходе эксплуатации;
- срок поставки ЗИП сравним с назначенным сроком хранения элементов ЗИП, что отрицательно сказывается на уровне надежности находящихся в ЗИП и используемых при ремонте НТО РКК



элементов в конце срока хранения, в период, на который, как правило, приходится наибольшее число отказов;

- при единовременной поставке ЗИП происходит омертвление финансовых средств, уменьшается возможность управления техническим состоянием РКК путем перераспределения средств.

Можно выделить следующие возможные пути повышения эффективности функционирования систем обеспечения запасными элементами НТО ТК и СК:

- с учетом особенностей НТО ТК и СК как объекта эксплуатации применять одношелонное построение системы снабжения;
- применять адаптивные стратегии обеспечения запасами как по периоду пополнения, так и по объему допоставок;
- спрос на элементы ЗИП оценивать на основе индивидуального прогнозирования технического состояния оборудования;
- при планировании запасов учитывать текущую экономическую ситуацию, возможности ремонтной базы и мониторинга оборудования, выбор вариантов мероприятий по повышению технического состояния.

Таким образом, с одной стороны, для обеспечения высокой надежности и безопасности функционирования в течение всего назначенного срока эксплуатации необходимо обеспечение достаточным объемом ЗИП. С другой стороны, большой объем ЗИП приводит к «замораживанию» финансовых средств и безвозвратной потере части элементов ЗИП по истечении срока хранения.

Наиболее рациональным является подход на основе адаптивного управления запасами ЗИП НТО ТК и СК, который заключается в следующем:

- поставка ЗИП НТО ТК и СК разбивается на несколько очередей;
- первоначально необходимый объем поставляется не на весь срок эксплуатации, а на меньший период (1-я очередь);
- дальнейшие поставки корректируются по результатам эксплуатации оборудования и контроля его технического состояния средствами измерительного комплекса, с тем чтобы обеспечить требуемые показатели надежности НТО ТК и СК в период эксплуатации между очередями поставки запасных элементов.

Таким образом, для обеспечения безопасности и надежности функционирования НТО ТК и СК обоснованной является разработка прикладных программ, измерительных комплексов, процедур и методик, позволяющих реализовать адаптивное управление ЗИП НТО ТК и СК.

При этом задача адаптивного управления формированием ЗИП НТО ТК и СК формулируется следующим образом: при заданных структуре НТО ТК и СК, априорных оценках параметров надежности и известных методах неразрушающего контроля текущего технического состояния элементов системы найти состав измерительных комплексов, прикладных программ обработки результатов измерений, процедур и методик формирования и восполнения ЗИП НТО ТК и СК, расчета периода и объема поставки ЗИП, обеспечивающих наибольший экономический эффект от применения сис-

темы по назначению при условии соблюдения требований по надежности и безопасности.

Для решения основной задачи адаптивного управления формированием ЗИП НТО ТК и СК в работе решены несколько частных задач:

- осуществлена декомпозиция НТО ТК и СК на составные элементы;
- определены приборы контроля параметров технического состояния элементов НТО ТК и СК, входящие в состав измерительного комплекса, и перечень контролируемых параметров для системы диагностирования;
- созданы алгоритмы для прогнозирования изменения технического состояния элементов НТО РКК по результатам измерения;
- созданы алгоритмы для прогнозирования спроса на составные элементы НТО ТК и СК на основе оценок их технического состояния;
- сформирован оптимальный состав ЗИП НТО ТК и СК исходя из прогнозируемого спроса на элементы ЗИП НТО ТК и СК.

Эти результаты получены благодаря выбору следующих направлений исследований:

- разработка измерительных комплексов, позволяющих наиболее эффективно контролировать параметры НТО ТК и СК, которые характеризуют его техническое состояние;
- создание процедур и методик, позволяющих на основе результатов измерений прогнозировать изменение технического состояния и спрос на составные элементы НТО ТК и СК, в результате чего сформулированы требования к структуре,

составу и порядку восполнения ЗИП НТО ТК и СК;

- разработка прикладных программ, позволяющих автоматизировать процессы накопления и хранения результатов измерений, а также их обработки с использованием соответствующих процедур и методик для расчета оптимальной структуры, состава и порядка восполнения ЗИП.

Такой подход основывается на проведенном анализе функционально-топологической структуры КРК, режимов эксплуатации НТО ТК и СК, последствий отказов НТО, возможных путей повышения эффективности функционирования системы обеспечения запасными элементами НТО ТК и СК. В результате выбрана стратегия управления на основе адаптивного управления запасами ЗИП НТО ТК и СК, позволяющая учитывать выявленные особенности.

Результаты, представленные в настоящем разделе, позволяют сделать следующие выводы:

1. Практические рекомендации, полученные в ходе решения проблемы преодоления противоречий между сложностью строения и динамичностью поведения НТО ТК и СК, с одной стороны, и фрагментарным, статичным воздействием на безопасность процессов их функционирования, с другой стороны, направлены на выполнение практических задач, сформулированных в руководящих документах по обеспечению безопасности космической деятельности, таких как федеральные законы РФ, постановления Правительства РФ, ГОСТы, руководящие документы Ростехнадзора и Роскосмоса.

2. Апробация теоретических и практических положений, представленных в настоящей монографии, выполнялась на стартовом оборудовании КРК таких комплексов, как «Зенит-М», «Ангара», «Морской старт», а также по проекту создания Корейской космической системы запуска КА. Сформулированные практические положения имеют в качестве главной цели повышение уровня безопасности процессов функционирования НТО ТК и СК прежде всего на КРК военного назначения, для которых потенциальный уровень ущерба от невыполнения задач по своевременному пуску РКН имеет военно-политические последствия глобального характера.

3. Реализация представленных в монографии практических положений затрагивает технический, кадровый, административный и программно-аппаратный аспекты управления безопасностью НТО ТК и СК и рассчитана на длительный период. Однако уже сегодня проведены частичные изменения штатной структуры КБТМ, создан и введен в эксплуатацию комплекс по проектированию, моделированию и управлению при создании и эксплуатации образцов новой техники (КМК), разработана архитектура системы автоматизированного формирования исходных данных (САФИД), создается автоматизированная система координации и управления работ СК и ТК (АСКУР) для КРК «Ангара» и др. При этом помимо повышения уровня безопасности функционирования НТО ТК и СК получен заметный рост прибыли для предприятия, позволивший инвестировать в дальнейшее внедрение новых научно-технических разработок в повседневную деятельность КБТМ.

4. Предложенный в монографии новый методологический подход для обеспечения безопасности процессов функционирования НТО ТК и СК реализует стратегию минимизации ресурсопотребления активных средств наземных комплексов КРК как в отношении обслуживающего персонала, так и в отношении технических средств, участвующих во всех этапах жизненного цикла технологического оборудования комплексов. Реализация предложенного в работе принципа равной безопасности технологических операций еще раз подтвердила необходимость более глубоких исследований газодинамических, акустических, теплофизических и вибрационных процессов пуска РКН. В результате аналитических, расчетных и экспериментальных исследований по этому направлению предложен новый способ организации взаимодействия струи продуктов сгорания с элементами пусковой установки, который был запатентован [163]. На основе предложенного способа сделаны рекомендации по оптимизации параметров и конструкции пусковой установки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ РВ 15.201-2003. Военная техника. Тактико-техническое (техническое) задание на выполнение опытно-конструкторских работ.
2. Морозов Л.М., Петухов Г.Б., Сидоров В.Н. Методологические основы теории эффективности. МО СССР. Л., 1982.
3. Степанов М.И. Инженерная методика управления качеством и надежностью систем заправки и температурно-влажностного режима РКК на стадии их эксплуатации с использованием САПР предприятия – разработчика. КБТХМ, 1995.
4. Петухов Г.Б. Теоретические основы и методы исследования эффективности оперативных целенаправленных процессов. Учебное пособие. МО, 1979. – 176 с.
5. Гуд Г.Х., Макол Р.Э. Системотехника. Введение в проектирование больших систем. Пер. с англ. под ред. Поварова Г.Н. – М.: Советское радио, 1962. - 382 с.
6. Оптнер С. Системный анализ для решения деловых и промышленных проблем. – М.: Сов. радио, 1969.
7. Бусленко Н.П., Калашников В.В., Коваленко И.Н. Лекции по теории сложных систем. – М.: Советское радио, 1973.
8. Дружинин В.В., Конторов Д.С. Системотехника. – М.: Радио и связь, 1985.
9. Николаев В.И., Брук В.М. Системотехника: методы и приложения. – Л.: Машиностроение, 1985.
10. Резников Б.А. Системный анализ и методы системотехники: учебник. МО, 1990. – 522 с.
11. Космодром / Под ред. Вольского А.П. – М.: Воениздат, 1977. – 309с.
12. Бармин В.П., Леперсон М.Н. Основы проектирования установщиков. – М.: Машиностроение, 1971. – 462с.
13. Караштин В.М., Катков А.Г., Родченко В. В. Основы проектирования систем наземного обеспечения. – М.: изд-во МАИ, 1998. – 312 с.: ил. ISBN 5-7035-2086-X.

14. Соловьев В.Н. (дис. д.т.н.). – М., 1981.
15. Бирюков Г.П. (дис. д.т.н.). – Л., 1984.
16. Любарский С.Д. (дис. д.т.н.). – Л., 1984.
17. Воробьев А. М. (дис. д. т. н.). – Л., 1972.
18. Елисеев В. Г. (дис. д. т. н.). – М., 1989.
19. Недайвода А.К. (дис. д. т. н.). – М., 1998.
20. Резников Б.А. Системный анализ и методы системотехники: Учебник. МО, 1990. – 522 с.
21. Макаров И.М., Виноградская Т.М., Рубчинский А.А., Соколов В.Б. Теория выбора и принятия решения: уч. пособие. – М.: Наука. Главная редакция физ.-мат. наук, 1982. – 328 с.
22. Иванин В.Я. Боевой ракетный комплекс 15П030 и пусковое устройство 15П730 БРК 15П030. – М.: ВА им. Ф.Э. Дзержинского, 1979. – 131с.
23. Хлыбов В.Ф. Основы теории и разработки заправочного оборудования и систем термостатирования. – М., 1994. – 277 с.
24. Гранкин Б.К. (дис. д. т. н. ). – Л., 1985.
25. Шарапов В.С. (дис. к. т. н. ). – М., 1975.
26. Егоров В.А., Гранкин Б.К. Унификация моделей гибких производственных систем при проектировании. Электронная техника. – Вып. 4, – 1987.
27. Аксянов Ф.С. (дис. к. т. н.). – Л., 1980.
28. Голиков И.О., Гранкин Б.К., Структурные методы проектирования агрегатов технологического оборудования. МО СССР, Л., 1996.
29. Шульженко А.Г. (дис. к.т.н.). – СПб., 1998.
30. Федоров А.В. (дис. к. т. н.). – СПб., 1997.
31. Тимашев С.В., Чилин Ю.Н., Кузьмин М.А. Оптимизация энергетических систем орбитальных пилотируемых станций. – М.: Машиностроение, 1986. – 232 с.: ил.
32. Лысенко И.В. (дис. д. т. н.). – Л., 1992.
33. Ковалев А.П. Ракетно-космический комплекс как объект эксплуатации. – СПб.: ВИККА, 1998.
34. Гузенко В.Л. (дис. к. т. н.). – СПб., 1998.
35. Козин П.А. (дис. д. т. н.). – СПб., 1999.



36. Безопасность космических полетов / Г.Т. Береговой, А.А. Тищенко, Г.П. Шибанов и др. – М.: Машиностроение, 1977. – 264 с.
37. Гарюнов В.И. Показатели безопасности эксплуатации КСр. Задание и оценивание. – СПб: ВИКА, 1993. – 60 с.
38. Гранкин Б.К., Ронжин О.В. Структурный анализ и безопасность систем потокораспределения. – СПб.: ВИКИ им. А.Ф. Можайского, 1975. – 58 с.
39. Керножицкий В.А. Основы количественной оценки безопасности эксплуатации технических устройств. – МО СССР, 1978. – 58 с.
40. Краснов О.В. Безопасность эксплуатации сложных технических систем. – СПб: ВИКУ, 2001. – 243 с.: ил.
41. Смирнов В.И. Методология обеспечения безопасности стартовых комплексов при их проектировании. – М.: Изд-во МАИ, 2003. – 140 с.: ил.
42. Справочник по безопасности космических полетов. Г.Т. Береговой, В.И. Ярополов, И.И. Баранецкий и др. – М.: Машиностроение, 1989. – 336 с.: ил.
43. Федоров А.В. Обеспечение безопасности процесса функционирования стартового комплекса при возникновении нештатных ситуаций. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2004. – 136 с.
44. Перминов А.Н. Управление наземной космической инфраструктурой на основе мониторинга ее состояния. МО РФ. – СПб., 2005. – 320 с.
45. Баранов Л.Т. Управление эксплуатацией космических средств. МО РФ. – СПб., 2004. – 413 с.
46. Месарович М., Такахара Я. Общая теория систем: математические основы. – М.: Мир, 1978.
47. Надежность и эффективность в технике: Справочник: в 10 т. / Ред. совет.: В.С. Авдусевский (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 1987.
48. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Глава 11. Корн Г., Корн Т. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984.

49. Кремер Н.Ш., Путко Б.А. Эконометрика: Учебник. М.: Юнити-Дана, 2007. – 311 с.
50. Назаров А.А. Морфологическое прогнозирование развития военной техники. – МО СССР, 1986. – 248 с.
51. Оре О. Теория графов. – 2-е изд. - М.: Наука. Главная редакция физико - математической литературы, 1980. – 336 с.
52. Емеличев В.А., Мельников О.И., Сарванов В.И., Тышкевич Р.И. Лекции по теории графов. – М.: Наука. Гл. ред. физ. - мат. лит., 1990. – 348 с.
53. Седов Л.И. Механика сплошных сред. Т. 1, 2. – 4-е изд. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1983. - 528 с.
54. Легасов В.А. Проблемы безопасного развития техносферы // Коммунист. – 1987. – №8. – С. 92-101.
55. Легасов В.А., Демин В.Ф., Шевелев Я.В. Нужно ли знать меру в обеспечении безопасности? // Энергия. Экология. – 1984. – №8. – С. 9-17.
56. Дмитриев А.К., Юсупов Р.М. Идентификация и техническая диагностика. – МО СССР, 1987. – 521 с.
57. Зайцев А.В. Метод экспериментального оценивания эргономических характеристик человеко-машинных систем наземного автоматизированного комплекса управления космическими аппаратами: дисс. канд. техн. наук. – СПб.: ВИККА, 1997.
58. Зайцев А.В., Юнацкевич Р.И. Планирование процедур контроля функционального состояния операторов человеко-машинных систем // Известия вузов. Приборостроение, – 2000. – Т. 43. – № 8. – С. 97-101.
59. Зайцев В.С. Системный анализ операторской деятельности. – М.: Радио и связь, 1990. – 120 с.
60. Поляк Б.Т. Введение в оптимизацию. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. – 348 с.
61. Половинкин А.И., Бобков Н.К., Буш Г.Я. и др. Автоматизация поискового конструирования / Под ред. А.И. Половинкина. – М.: Радио и связь, 1981. – 344с.: ил.

62. Бирюков Г.П., Гранкин Б.К., Козлов В.В., Соловьев В.Н. Основы проектирования ракетно-космических комплексов. – СПб.: Алфавит, 2002. – 395 с.
63. Петров Г.Д. Методика мониторинга технического состояния элементов стартового оборудования ракетно-космических комплексов с продленными сроками службы: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 1999. – 203 с.
64. РОБЭВКВ
65. Калман Р., Фалб П., Арбиб М., Очерки по математической теории систем, – М.: Мир, 1971.
66. Арбиб М.А., Мейнс Э. Дж. Основание теории систем. Разложимые системы. Математические методы в теории систем. – М.: Мир. 1979.
67. ГОСТ 12.0.002-80. ССБТ Термины и определения.
68. ГОСТ 12.1.003-83. ССБТ Шум. Общие требования безопасности.
69. ГОСТ Р51901-2002. Управление надежностью. Анализ риска технологических систем.
70. ГОСТ Р51897-2002. Менеджмент риска. Термины и определения.
71. ОТТ 1.1.10-90.
72. ОТТ 11.1.4-88. Часть 6.
73. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Словарь терминов и определений. – 2-е изд. – М.: Знание, 1999. – 412 с.
74. ГОСТ 27.310-95. Межгосударственный стандарт. Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения. – М.: Издательство стандартов, 1997. – 19 с.
75. ПБ 09-170-27. Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств. Утверждены постановлением Госгортехнадзора России от 22.12.97 № 52.

76. РД-03-418-01. Методические рекомендации по идентификации опасных производственных объектов. Госгортехнадзор России, 1999. – 38 с.
77. РД-03-418-01. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов. Госгортехнадзор России, 2001 // Безопасность труда в промышленности. – 2001. – №10. – С. 40-50.
78. Анцелович Л.П. Надежность, безопасность и живучесть самолета. – М.: Машиностроение, 1985. – 296 с.
79. Безопасность полетов. Р.В. Сакач, Б.В. Зубков, М.Ф. Давиденко и др. / Под ред. Р.В. Сакача. – М.: Транспорт, 1989. – 239 с.
80. Жулев В.И., Иванов В.С. Безопасность полетов летательных аппаратов: Теория и анализ. – М.: Транспорт, 1986. – 224 с.
81. Бирюков Г.П., Смирнов В.И., Торпачев А.В. Разработка систем обеспечения безопасности функционирования ракетно-космических комплексов. – М.: Изд-во МАИ, 2002.
82. Волков Л.И. Управление эксплуатацией летательных комплексов: Учебное пособие. – М.: Высш. школа, 1981. – 368 с.
83. Гончар А.Г., Гранкин Б.К., Козлов В.В., Смирнов В.И., Федоров А.В., Шарапов В.С. Методология обеспечения безопасности стартовых комплексов. – М.: Изд-во КБТМ, 2008. – 406 с.: ил.
84. Безопасность России. Функционирование и развитие сложных народнохозяйственных, технических, энергетических, транспортных систем, систем связи и коммуникаций. – М.: Знание, 1998. Т.1. – 444 с., т.2. – 410 с.
85. Лысенко И.В. Анализ и синтез сложных технических систем. Ч.1. Анализ и синтез систем обеспечения готовности ракет-носителей и космических аппаратов к запуску (основы теории). – М.: Воениздат, 1995. – 368 с.: ил.
86. Петухов Г.Б. Основы теории эффективности целенаправленных процессов. Ч.1. Методология, методы, модели. МО СССР, 1989. – 660 с.

87. Чернорудский И.Г. Методы оптимизации и принятия решений: Учебное пособие. – СПб.: Издательство «Лань», 2001. – 384 с.
88. Федоров А.В. Критерии возникновения происшествия в процессе функционирования сложной технической системы // Моделирование и анализ безопасности в сложных системах: Труды международной научной школы МА БР-2004. – СПб., 2004. – с. 538-542.
89. Жуков Г.П., Викулов С.Ф. Военно-экономический анализ и исследование операций. Учебник. – М.: Военное издательство, 1987. – 440 с.
90. ГОСТ Р 22.9.05-95 БЧС Комплексы средств индивидуальной защиты спасателей. ОТГ.
91. Евенко Л.И., Мильнер Б.З., Раппопорт В.С., Шершнев Е.С. Организация структуры управления производством. – М.: Экономика, 1975. 319 с.
92. Кузнецов А.Н. Методологические основы анализа функционирования и развития системы эксплуатации космических средств. – СПб: Наука, 2002. – 168 с.
93. Контроль функционирования больших систем. – М.: Машиностроение, 1977.
94. Дмитриев А.К. Мальцев П.А. Основы теории построения и контроля сложных систем. – Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отд., 1988.
95. Винер Н. Новые глаза кибернетики. М.: Сов. радио, 1963. – 63 с.
96. Колмогоров А.Н. Три подхода к определению понятия количества информации // Проблемы передачи информации. – 1965. – № 1. – С. 3-11.
97. Резников Б.А. Докторская диссертация, 1969. Докторская диссертация, 1971.
98. Козеев В.А. Прогнозирование состояний бортовых систем летательных аппаратов. МО СССР, 1981. – 92 с.
99. Мозгалеvский А.В., Гаскаров Д.В. Техническая диагностика. – М. Высшая школа, 1975. – 207 с.
100. РД 50-490-84 Методические указания. Техническая диагностика. Прогнозирование остаточного ресурса машин

и деталей по косвенным параметрам.

101. ОТТ 11.1.29-92.
102. Барзилович Е.Ю., Воскобоев В.Ф. Эксплуатация авиационных систем по состоянию. – М.: Транспорт, 1981. – 196 с.
103. Гаскаров Д.В., Голинкевич Т.А., Мозгалеvский А.В. Прогнозирование технического состояния в надежности радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Сов. радио, 1874. – 224 с.
104. Техническое задание на составную часть опытно-конструкторской работы по созданию КРК «АН-ГАРА». Универсальный стартовый комплекс 441-1А-001 ТЗ. ФГУП Государственный космический научно-производственный центр им. М.В. Хруничева, 2001. – 57 с.
105. Миронов А.Н. Теоретические основы и методы много-модельного прогнозирования долговечности сложных военно-технических систем космического назначения. МО РФ, 2000. – 429 с.
106. ГОСТ В 25883-83. Эксплуатация и ремонт изделий военной техники. Термины и определения.
107. Петров Г.Д. Методологические аспекты обеспечения долговечности механического оборудования стартовых комплексов на основе функционального мониторинга. ВКА. СПб., 2005. – 201 с.
108. Изобретение: Пусковая установка ракеты-носителя с вырожденным спектром излучения механических колебаний (варианты), согласованный с такой установкой способ пуска ракеты-носителя и способ подготовки к осуществлению последнего. Заявка № 2006116784, дата приоритета 17.05.2006, дата регистрации патента в Госреестре РФ 27.06.2008. Патент № 2 327 941, Российская Федерация, МПК: F41F, 3/0.
109. Голиков И.О., Гранкин Б.К. Структурные методы проектирования агрегатов технологического оборудования. – МО РФ, 1996 .

110. Балдин К.В. Риск – менеджмент. Учебное пособие. – М.: Эксмо, 2006. – 368 с.
111. Барлоу Р., Прошан Ф. Статистическая теория надежности и испытания на безотказность. – М.: Наука, 1984. – 328 с.
112. Беллман Р., Дрейфус С. Прикладные задачи динамического программирования. – М.: Наука, 1965. – 458 с.
113. Емеличев В.А., Комлик В.И. Метод построения последовательности планов для решения задач дискретной оптимизации. – М.: Наука. – 1981. – 208 с.
114. Модели и методы оптимизации надежности сложных систем / Волкович В.Л., Волошин А.Ф., Заславский В.А., Ушаков И.А. – Киев.: Наукова Думка, 1993. – 312 с.
115. Михалевич В.С., Волкович В.Л. Вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем. – М.: Наука. – 1982. – 286 с.
116. Модели и методы оптимизации надежности сложных систем / Волкович В.Л., Волошин А.Ф., Заславский В.А., Ушаков И.А. – Киев.: Наукова Думка, 1993. – 312 с.
117. Старение и прогнозирование ресурса оборудования атомных станций. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 288с.
118. Миронов А.Н. Теоретические основы и методы много-модельного прогнозирования долговечности сложных военно-технических систем космического назначения. МО РФ, 2000. – 430 с.
119. Острейковский В.А. Физико-статистические модели надежности элементов ЯЭУ. – М: Энергоатоммаш, 1986. – 200 с.
120. Гленсдорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуации: пер. с англ. под ред. Ю.А. Чизмадзе. – М.: Мир, 1973. – 280 с.
121. Mori H Phys/ Rev/, 112, 1829 (1958).
122. Поляков С.А. Проблемы оптимальной реализации явления избирательного переноса при подборе триботехнических материалов // Долговечность трущихся деталей машин. – М.: Машиностроение, 1985. – Вып. 1. – С. 74-82.

123. Гутман Э.М. Механохимия металлов и защита от коррозии. – М.: Металлургия, 1974. – 232 с.
124. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: учеб. пособие: в 10 т. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988.
125. Лейбкинд А.Р., Рудник Б.Л., Тихомиров А. А. Математические методы и модели формирования организационных структур. – М.: Изд. МГУ, 1982. – 232 с.
126. Мильнер Б.З., Евенко Л.И., Рапопорт В.С. Системный подход к организации управления. – М.: Экономика, 1983. – 224с.
127. Бурков В.Н., Грацианский Е.В., Дзюбко С.И., Щепкин А.В. Модели и механизмы управления безопасностью. Серия «Безопасность». – М.: СИНТЕГ, 2001. – 160 с.
128. Евенко Л.И. Организационные структуры управления промышленными корпорациями США. – М.: Наука, 1983. – 350 с.
129. Мильнер Б.З. Организация программно-целевого управления. – М.: Наука, 1980. – 376 с.
130. Проблемы программно-целевого планирования и управления / Под ред. Г.С. Поспелова. – М.: Наука, 1981. – 464 с.
131. Кнорринг В.И. Теория, практика и искусство управления. – М.: Норма-Инфра.М, 1999.
132. Сай В.М. Формирование организационных структур управления. – М.: ВИНТИ, 2002. – 431 с.
133. Теория организации: Антология / Составление В.Л. Семикова. – М.: Академический проект: Гаудеамус, 2005. – 960 с.
134. Технология синтеза организационных структур сложных систем управления. – М.: ГУП «ВИМИ», 1998. – 224 с.
135. Жамбю М. Иерархический кластер-анализ и соответствия. – М.: Финансы и статистика, 1988. – 344 с.
136. Киселев А.И., Медведев А.А., Меньшиков В.А. Космонавтика на рубеже тысячелетий. Итоги и перспективы. – М.: Машиностроение, 2001. – 672 с.



137. Маньшин Г.Г., Барзилович Е.Ю., Воскобоев В.Ф. Методы профилактического обслуживания эргатических систем. – Мн.: Наука и техника, 1983.
138. Баранов Л.Т. Управление эксплуатацией космических средств. – МО РФ, 2004, – 413 с.: ил. 82.
139. Первозванский А.А. Математические модели в управлении производством. – М.: Наука, 1975. – 616 с.
140. Баранов Л.Т. Планирование процесса обучения боевых расчетов действиям в нештатных ситуациях // Сб. трудов НТК «Х Макеевские чтения», ноябрь 2003 года.
141. Денисов А.А., Колесников Л.Н. Теория больших систем управления: Уч. пособие для вузов. – Л.: Энергоиздат, Ленингр. отделение, 1982. – 288 с.: ил.
142. Цвиркун А.Д. Структура сложных систем. М.: Радио, – 1975.
143. Юсупов И.Ю. Автоматизированные системы принятия решений. – М.: Наука, 1983.
144. Ростовцев Ю.Г. Основы построения автоматизированных систем сбора и обработки информации. Учебник. – СПб.: ВИККИ, 1992.
145. Лескин А.А., Мальцев В.Н. Системы поддержки управленческих и проектных решений. – Л.: Машиностроение, 1990.
146. Башлыков А.А. Проектирование систем принятия решений в энергетике. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
147. Гончар А.Г., Макаров Ю.Н. Организация эксплуатации космических средств. Уч. пособие. Военная академия им. Ф.Э. Дзержинского. – М., 1997.
148. Гончар А.Г., Клименко Ю.Л., Медушевский Л.С. Надежность, эксплуатация и экономическая эффективность функционирования сложных систем. Сборник. МО, 1997.
149. Гончар А.Г., Макаров Ю.Н., Черногор И.Б. Коммерческие возможности и перспективы космической деятельности. Новизна. Риски. Гарантии. // Материалы международной конференции. – М., 1997.

150. Гончар А.Г., Богданов Ю.В., Кухарев В.П. Методические положения по определению норм потребления ресурсов при эксплуатации ракетно-космических комплексов // Космос на страже Родины. Первые научные чтения по военной космонавтике памяти М.К. Тихонравова. – М.: Изд-во «КОСМО», 1998.
151. Гончар А.Г., Смирнов В.И. Основные направления развития научно-технического потенциала ФГУП КБТМ. Проблемы проектно-конструкторского обеспечения безопасности эксплуатации стартовых комплексов КРК // Военно-космическая деятельность России – истоки, состояние, перспективы. ВКА им. А.Ф. Можайского. – СПб, 2005.
152. Гончар А.Г., Ефимов М.П., Павутницкий Ю.В., Мазарченков В.А. Программный комплекс средств информационной поддержки процессов создания и эксплуатации современных КРК. Актуальность и необходимость создания // Труды пятого международного аэрокосмического конгресса IAC'06. – М., 2006.
153. Гончар А.Г., Ковригин А.Г., Шарапов В.С. Проектирование интерфейсов технологических систем стартового комплекса // Сборник тезисов 1-й конференции МАА – РАКЦ «Космос для человечества». – Королев, Московская область, 2008.
154. Гончар А.Г., Абросимов Н.А. Система автоматизированного формирования исходных данных (САФИД) на разработку КРК. Предпосылки, актуальность и необходимость создания // Труды пятого международного аэрокосмического конгресса IAC'06. – М., 2006.
155. Гончар А.Г., Паршин Д.А., Торпачев А.В. Программный комплекс эксплуатационно-технического обеспечения наземного технологического оборудования // Научно-технический сборник «Ракетно-космические комплексы» КБТМ-МАТИ. – № 1. – М., 2006.

156. Гончар А.Г., Давыдов В.А., Макаров Ю.Н. Экономические аспекты устойчивого развития предприятия оборонно-промышленного комплекса. Проблемы и направления их решения // Военно-космическая деятельность России – истоки, состояние, перспективы. – ВКА им. А.Ф.Можайского. – СПб, 2005.
157. Гончар А.Г. Прогнозная оценка стоимости создания и эксплуатации наземного комплекса РН и РБ // Труды XXXVI Уральского семинара Российской академии наук. Механика и процессы управления. Том 2. – Екатеринбург: УрО РАН, 2006.
158. Гончар А.Г., Абросимов Н.А. Ракета и наземный комплекс. Совершенство в поиске компромиссов. – Изд-во «РЕСТАРТ», «Российский космос». – №1/2006.
159. Гончар А.Г., Бут А.Б., Соколова Т.Т., Шилов Л.А. Проблемы газодинамики старта при создании стартовых комплексов // Научно-технический журнал «Космонавтика и ракетостроение». – №1(42). – ЦНИИМАШ, 2006.
160. Бирюков Г.П., Гранкин Б.К., Козлов В.В., Соловьев В.Н. Основы проектирования ракетно-космических комплексов. – СПб.: Издательство Алфавит, 2002. – 395 с.
161. Садин Д.В. Основы теории моделирования волновых гетерогенных процессов. – СПб.: ВИКА им. А.Ф. Можайского, 2000.

*Научное издание*

**Гончар Алексей Григорьевич**

**УПРАВЛЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТЬЮ  
НАЗЕМНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО  
ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ И  
ПУСКА РАКЕТ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ**

Редактор *Л.Ф. Галахова*

Компьютерная верстка *А.А. Гончар, О.С. Курило*

Подписано в печать 11.02.2009

Формат 60×84 1/16

Гарнитура «Таймс»

Усл. печ. л. 25,3. Уч.-изд. л. 25

Тираж 300 экз.

Заказ 387

Издательство КБТМ

Проспект Вернадского, дом 101, корп. 2, Москва,  
Россия, 119526

Отпечатано в типографии КБТМ

Проспект Вернадского, дом 101, корп. 2, Москва,  
Россия, 119526

ISBN 978-5-9901665-2-3



9 785990 166523